



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

# **DINÂMICA DO TRANSPORTE DE CASCALHOS SOLÚVEIS EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

Fabio Rodrigues Gonçalves da Silva

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Orientadores: André Leibsohn Martins, D.Sc.  
Regis da Rocha Motta, Ph.D.

Rio de Janeiro,  
Fevereiro de 2014

# **DINÂMICA DO TRANSPORTE DE CASCALHOS SOLÚVEIS EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

Fabio Rodrigues Gonçalves da Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO DA  
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

Examinada por:

---

Prof. André Leibsohn Martins, D.Sc

---

Prof. Regis da Rocha Motta, Ph.D

---

Prof. Paulo Couto, Dr. Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
FEVEREIRO DE 2014

Silva, Fabio Rodrigues Gonçalves da

Dinâmica do Transporte de Cascalhos Solúveis em Fluidos de Perfuração de Poços de Petróleo – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2014.

XI 66 p.: il,: 29,7 cm

Orientadores: André Leibsohn Martins

Regis da Rocha Motta

Projeto Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/  
Curso de Engenharia de Petróleo, 2014.

Referências Bibliográficas: p.64-66.

1. Estudo da economicidade da perfuração da camada de sal utilizando fluido base água diante do aumento das taxas de penetração da broca. 2. Dissolução do sal durante a perfuração. 3. Comportamento da velocidade de sedimentação da partícula salina. 4. Velocidade de transporte e razão de transporte. 5. Efeitos da concentração de partículas e da parede. 6. Influência da vazão de injeção de fluido e da viscosidade na velocidade de sedimentação da partícula. I. Motta, Regis da Rocha et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Petróleo. III. Dinâmica do transporte de cascalhos solúveis em fluidos de perfuração de poços de petróleo.

## **Agradecimentos**

À minha família, pelo amor e apoio incondicionais dados durante toda minha vida e por me proporcionar sempre as melhores condições para a minha formação pessoal e profissional.

À minha namorada, Marcella Costa, por todo amor, dedicação e apoio que sempre me proporcionou. Não tenho nem palavras para descrever o quanto você foi, é e será importante na minha vida.

Aos meus amigos, por terem me proporcionado uma vida acadêmica muito mais divertida e pela contribuição, mesmo que indireta, para a minha formação.

Aos meus orientadores, André Leibsohn Martins e Regis da Rocha Motta, por terem me apoiado incondicionalmente na realização deste projeto. Só tenho a agradecer pela grande ajuda.

Ao professor Luís Américo Calçada, por seus ensinamentos acerca da dissolução de partículas salinas, que foram essenciais para a elaboração desta pesquisa.

Ao mestre Roni Abensur Gandelman, por ter contribuído bastante com dicas e ensinamentos durante todo o período de realização da pesquisa. Sempre que solicitado, respondeu prontamente a todas as minhas dúvidas.

Ao professor Paulo Couto, pelas significativas contribuições durante toda minha formação acadêmica. Além do apoio e auxílio na elaboração dessa pesquisa.

À Petrobras por seu enorme apoio à pesquisa brasileira.

Ao PRH-21, responsável por financiar pesquisas, ajudando na minha formação acadêmica e também na realização deste projeto.

*Fabio Rodrigues Gonçalves da Silva*

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

## **DINÂMICA DO TRANSPORTE DE CASCALHOS SOLÚVEIS EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

Fabio Rodrigues Gonçalves da Silva

Fevereiro/2014

Orientadores: André Leibsohn Martins, Ds.C.

Regis da Rocha Motta, Ph. D.

Curso: Engenharia de Petróleo

Este estudo trata especificamente da modelagem do transporte de cascalhos salinos em um fluido de perfuração base água do tipo Lei de Potência. Ao longo do processo de solubilização, o cascalho vai reduzindo seu diâmetro transformando-se em um problema onde a velocidade terminal não é atingida. A formulação do problema consiste em duas etapas principais: a conservação do momento linear com o termo de inércia e fenômenos de transferência de massa (AKSEL'RUD, 1992). O sistema de equações foi solucionado utilizando um método numérico, implementado através do programa Mathematica. Os cálculos foram feitos para partícula esférica, Reynolds menores que trinta, temperatura constante e aplicando-se as devidas correções para os efeitos de população e de parede. Além disso, os resultados numéricos foram comparados com os resultados analíticos referentes a equação para a velocidade de sedimentação que não considera o termo de inércia na sua formulação. A metodologia de solução numérica proposta permite projetar poços de maneira menos conservadora levando à possibilidade de aumento da taxa de avanço da broca e, conseqüentemente reduzindo custos operacionais.

Palavras chave: perfuração de poços, velocidade de sedimentação, transporte de sólidos.

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

TRANSPORT DYNAMICS OF SOLUBLE ROCK CUTTINGS IN THE DRILLING FLUIDS  
INTO PETROLEUM WELLS.

Fabio Rodrigues Gonçalves da Silva

February/2014

Advisor: André Leibsohn Martins, Ds.C.

Regis da Rocha Motta, Ph.D.

Course: Petroleum Engineering

This study specifically addresses the modeling of the saline rock cuttings transport in a water based mud modeled as a Power-law fluid. Along the solubilization process, the rock cutting reduces its diameter becoming a problem, where the terminal velocity is not reached. The problem formulation consists of two main steps: the linear momentum conservation with the inertia term and the mass transfer phenomena (AKSEL'RUD, 1992). The system of equations was solved using a numerical method, implemented through the Mathematica program. The calculations were made for spherical particle, Reynolds lower than thirty, constant temperature and applying the appropriate corrections for wall and particle concentration effects. Furthermore, the numerical results were compared with the analytical results of the settling velocity equation which does not consider the inertia term in its formulation. The methodology of the numerical solution allows us to project wells in a less conservative way leading us to the possibility of increasing the rate of penetration of the bit, so we can diminish the operational costs.

Keywords: drillings, slip velocity, solids transport.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivos .....	2
2	FUNDAMENTOS.....	3
2.1	Fluidos de Perfuração .....	3
2.2	Carreamento dos Cascalhos Formados .....	4
2.3	Classificação dos Fluidos de Perfuração.....	6
2.3.1	<i>Fluidos de Base Água</i> .....	7
2.3.2	<i>Fluidos de Base Óleo</i> .....	8
2.4	Reologia.....	9
2.4.1	<i>Líquidos Ideais</i> .....	9
2.4.2	<i>Tipos de Fluidos</i> .....	9
2.4.2.1	Fluidos Newtonianos .....	9
2.4.2.2	Fluidos não-Newtonianos .....	10
2.4.3	<i>Modelos Reológicos</i> .....	10
2.4.3.1	Modelo de Bingham ou Plástico Ideal.....	11
2.4.3.2	Modelo de Ostwald de Waale ou Lei de Potência.....	11
2.4.3.2	Modelo de Herschel-Bulkley ou Lei de Potência Modificada.....	12
2.5	Perfuração de Sal .....	13
2.5.1	<i>Estrutura e Composição</i> .....	13
2.5.2	<i>Problemas</i> .....	14
2.5.2.1	Dissolução – Alargamento do Poço .....	14
2.5.2.2	Deformação – Comportamento Plástico .....	16
2.5.2.2	Recristalização .....	16
2.5.3	<i>Opções de Fluidos de Perfuração de Base Água</i> .....	18
2.5.3.1	Fluido Saturado de Sal .....	18
2.5.3.2	Sistemas Levemente Subsaturados .....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
4	FORMULAÇÃO.....	28
4.1	Cálculo do Coeficiente de Arraste .....	32
4.2	Cálculo do Decaimento do Diâmetro da Partícula com o Tempo .....	32

4.3	Influência da Concentração de Partículas .....	35
4.4	Influência da Presença de Fronteiras Rígidas .....	35
5	RESULTADOS TÉCNICOS DA SIMULAÇÃO.....	38
5.1	Comportamento do diâmetro variável com o tempo.....	39
5.2	Comparação das Soluções com e sem o Termo de Inércia.....	41
5.3	Influência da Vazão de Injeção de Fluido.....	45
5.4	Correção da Velocidade de Sedimentação para os Efeitos de Parede e Concentração de Partículas.....	47
5.5	Velocidade de Transporte e Razão de Transporte .....	50
5.6	Influência da Viscosidade do Fluido.....	54
6	RESULTADOS TÉCNICOS DA SIMULAÇÃO.....	57
7	CONCLUSÕES.....	62
8	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	63
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Carreamento dos cascalhos pelo anular. ....	5
Figura 2.2 – Tipos de fluido. ....	10
Figura 2.3 – Seção que ilustra uma região que contém uma camada de sal. ....	13
Figura 4.1 – Diagrama de corpo livre. ....	28
Figura 5.1 – Diâmetro da partícula x Tempo. ....	40
Figura 5.2 – Fluxograma que ilustra a solução iterativa da equação da velocidade de sedimentação da partícula solúvel. ....	43
Figura 5.3 – Velocidade de sedimentação x Tempo. ....	44
Figura 5.4 – Velocidade de sedimentação x Tempo para a fase $17^{1/2}$ '' x 5'', com vazões de bombeio variando entre 600 e 1200 galões por minuto. ....	46
Figura 5.5 – Velocidade de sedimentação x Tempo para a fase $12^{1/4}$ '' x 5'', com vazões de bombeio variando entre 500 e 1000 galões por minuto. ....	46
Figura 5.6 – Velocidade de sedimentação x Tempo para a fase $8^{1/2}$ '' x 5'', com vazões de bombeio variando entre 400 e 600 galões por minuto. ....	46
Figura 5.7 – Velocidade de sedimentação corrigida x Tempo para a fase $17^{1/2}$ '' x 5''. ....	49
Figura 5.8 – Velocidade de sedimentação corrigida x Tempo para a fase $12^{1/4}$ '' x 5''. ....	49
Figura 5.9 – Velocidade de sedimentação corrigida x Tempo para a fase $8^{1/2}$ '' x 5''. ....	49
Figura 5.10 – Velocidade de transporte x Tempo para a fase $17^{1/2}$ '' x 5''. ....	51
Figura 5.11 – Razão de transporte x Tempo para a fase $17^{1/2}$ '' x 5''. ....	51
Figura 5.12 – Velocidade de transporte x Tempo para a fase $12^{1/4}$ '' x 5''. ....	52
Figura 5.13 – Razão de transporte x Tempo para a fase $12^{1/4}$ '' x 5''. ....	52
Figura 5.14 – Velocidade de transporte x Tempo para a fase $8^{1/2}$ '' x 5''. ....	53
Figura 5.15 – Razão de transporte x Tempo para a fase $8^{1/2}$ '' x 5''. ....	53
Figura 5.16 – Velocidade de sedimentação x Tempo, variando-se a viscosidade do fluido. ....	54
Figura 5.17 – Velocidade de transporte x Tempo, variando-se a viscosidade do fluido. ....	55
Figura 5.18 – Razão de transporte x Tempo, variando-se a viscosidade do fluido. ....	55
Figura 6.1 – Concentração volumétrica de sólidos no poço x Tempo, para uma vazão de 600 gpm. ....	59
Figura 6.2 – Concentração volumétrica de sólidos no poço x Tempo, para uma vazão de 900 gpm. ....	59

Figura 6.3 – Concentração volumétrica de sólidos no poço x Tempo, para uma vazão de 1200 gpm. .... 59

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Valores de $m$ de acordo com o número de Reynolds. ....	35
Tabela 5.1 – Dados para o cálculo do diâmetro da partícula variável com o tempo.....	39
Tabela 5.2 – Dados para o cálculo da velocidade de sedimentação da partícula. ....	41

# 1 INTRODUÇÃO

Com o crescente avanço das técnicas de perfuração, poços cada vez mais profundos e de geometria complexa, direcionais e horizontais, em ambientes deposicionais diversos, estão sendo construídos. Atualmente diversas descobertas na costa brasileira contemplam cenários altamente desafiadores. Essa evolução requer cuidado redobrado, pois os investimentos são muito altos, e os riscos são cada vez maiores quando se quer perfurar, especialmente quando há uma camada de sal. Nessa perspectiva, o foco do trabalho se concentra na remoção e transporte dos cascalhos gerados pela broca para a superfície através de um fluido bombeado para o interior do poço em construção. Mais à frente serão abordados os desafios e problemas de se perfurar a camada de sal.

Outro aspecto importante a ser analisado é qual o tipo de fluido que será utilizado no processo. Os fluidos sintéticos têm uma maior estabilidade térmica, reduzem o alargamento do poço – será explicada mais detalhadamente à frente – e possuem elevada lubrificidade. Em compensação, os fluidos de base água possuem um menor custo, uma formulação mais simples e uma maior facilidade de descarte.

Os fatores que governam a decisão de se perfurar um campo com um fluido base água são: disponibilidade de base orgânica, descarte de cascalhos e questões de logística. Entretanto, o fluido aquoso reage com a formação salina, solubilizando os cascalhos e, podendo causar o alargamento e até a obstrução do poço. Portanto, é importante que a sua formulação seja feita com o intuito de minimizar uma dissolução excessiva da formação. Um fluido saturado na cabeça do poço e levemente subsaturado no fundo acaba propiciando uma otimização na limpeza do poço. Os cascalhos gerados pela ação da broca entram em contato com o fluido e se dissolvem. Este fenômeno faz com que o tamanho e a velocidade de sedimentação dos cascalhos diminuam, aumentando a

velocidade de transporte deles para a superfície e, por conseguinte, reduzindo a concentração de sólidos no poço. Isso permite projetar poços de maneira menos conservadora levando à possibilidade de aumento da taxa de penetração da broca durante a perfuração da camada de sal, o que reduz o tempo total de perfuração e, logo, diminui o custo por metro perfurado.

## 1.1 Objetivos

Será, então, estudada a dinâmica do transporte de cascalhos esféricos salinos através de fluidos de perfuração de base água levemente subsaturados de sal, em condições isotérmicas. Será proposta uma equação para a velocidade de sedimentação da partícula solúvel, incluindo as influências da concentração de partículas e da parede e, da vazão de injeção e da viscosidade do fluido. Por fim, de acordo com um valor crítico para a concentração de sólidos no poço, será possível saber o quanto poderá ser aumentada a taxa de penetração da broca durante a perfuração da camada de sal.

## 2 FUNDAMENTOS

Nessa seção serão abordados os fundamentos que influenciam a remoção de cascalhos do poço, os quais darão suporte para um melhor entendimento desta operação. Primeiramente, será explicada a importância da utilização de fluidos de perfuração com a enumeração de suas diversas funções. Em seguida, será melhor detalhada uma importante função que um fluido exerce durante a perfuração: a remoção de cascalhos, foco do presente trabalho. Depois, serão definidos e comparados diferentes classificações para os fluidos com o intuito de explicar o porquê de um ser preferencial aos outros de acordo com o objetivo desse estudo. Será apresentado também uma visão geral sobre reologia, englobando os diferentes tipos de fluidos e seus modelos reológicos. No final dessa seção, ainda serão salientados os problemas e desafios de se perfurar a camada de sal.

### 2.1 Fluidos de perfuração

São misturas complexas de sólidos, líquidos e produtos químicos, podendo ser suspensões ou emulsões, dependendo do estado físico dos componentes.

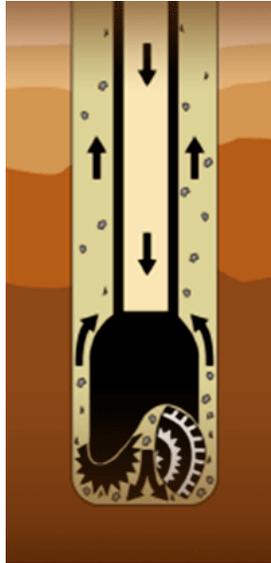
São responsáveis por diversas funções:

- Carrear os cascalhos formados;
- Manter os cascalhos em suspensão durante as interrupções de bombeio;
- Exercer pressão hidrostática sobre as formações, a fim de evitar kicks;
- Manter a estabilidade do poço;
- Selar as formações permeáveis;

- Minimizar os danos à formação;
- Resfriar e lubrificar a broca e a coluna de perfuração;
- Transmitir a energia hidráulica através dos equipamentos de perfuração;
- Assegurar avaliação adequada da formação;
- Controlar os processos de corrosão;
- Facilitar os processos de cimentação e completação;
- Minimizar os impactos ambientais causados.

## 2.2 Carreamento dos cascalhos formados

Uma importante função dos fluidos de perfuração é a remoção dos cascalhos, gerados pela ação da broca, do fundo do poço até a superfície. Durante sua circulação, ele sai dos tanques de armazenamento para a bomba, em seguida passa através da coluna de perfuração até sair pela broca e subir para a superfície através do espaço anular entre a coluna e o poço. Passa por um sistema de separação de sólidos e volta novamente para os tanques.



**Figura 2.1 – Carreamento dos cascalhos pelo anular.**  
(Fonte: [https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight\\_id=291&c\\_id=24](https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=291&c_id=24))

Um parâmetro usual que governa a limpeza de um poço vertical é a velocidade com que os cascalhos são transportados para a superfície ( $v_t$ ). Está definida como a diferença entre a velocidade do fluido no espaço anular e a velocidade de sedimentação da partícula.

$$v_t = v_f - v_p \quad (2.1)$$

Pode-se observar, que quanto maior a velocidade de sedimentação da partícula menor é a velocidade de transporte da mesma. Como consequência disso, menor também será a razão de transporte ( $R_t$ ) dos fragmentos de rocha em direção à superfície, aumentando sua concentração no espaço anular.

$$R_t = \frac{v_t}{v_f} = 1 - \frac{v_p}{v_f} \quad (2.2)$$

Quanto menor for a razão de transporte, pior será a limpeza do poço, ou seja, mais cascalhos serão depositados no seu leito inferior. Isto pode ocasionar diversos problemas,

como por exemplo:

- Redução da taxa de penetração;
- Prisão da coluna de perfuração;
- Obstrução do anular;
- Desgaste prematuro da broca;
- Perda de circulação;
- Entre outros.

Outro parâmetro que governa a limpeza do poço é a concentração volumétrica de sólidos no poço ( $C_{vt}$ ). Que é definida como o quociente entre a concentração volumétrica de sólidos na alimentação, ou seja, logo acima da broca e a razão de transporte.

$$C_{vt} = \frac{cv}{R_t} \quad (2.3)$$

Este parâmetro é de suma importância para o presente estudo. A partir de um valor crítico para a concentração de sólidos no poço será possível flexibilizar critérios de projeto, permitindo operações com maiores taxas de penetração da broca. Esse aumento reduzirá o tempo total de perfuração da camada de sal, o que fará com que o custo por metro perfurado diminua.

### 2.3 Classificação dos fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração podem ser classificados de três diferentes formas de acordo com a sua composição. Em geral, o critério que os diferencia é o componente principal da fase contínua. Com isso, os fluidos são classificados como fluidos de base água, fluidos de base óleo e fluidos de base ar.

Uma diferente composição, não só define a classificação do fluido, como fornece diferentes características e propriedades a cada um deles.

### 2.3.1 Fluidos de base água

São compostos basicamente por água, sais e polímeros dissolvidos e adensantes. Neste caso, a água é a fase contínua e de maior proporção dentre os componentes do fluido.

Algumas características:

- Baixa toxicidade;
- Apresentam melhores propriedades reológicas com a ação de polímeros;
- Apresentam baixa lubrificidade;
- Geralmente apresentam problemas em formações contendo folhelhos.

Os fatores que devem ser levados em conta quando se quer selecionar a água de preparo são:

- Disponibilidade;
- Custo de transporte e de tratamento;
- Tipos de formações geológicas a serem perfuradas;
- Produtos químicos que irão compor o fluido;
- Técnicas a serem utilizadas na avaliação das formações.

Os fluidos aquosos inibidos são utilizados para perfurar rochas de elevado grau de atividade, que interagem quimicamente com a água doce, tornando-se plástica, expansível, dispersível, ou como no caso do presente estudo, solúvel. Nos fluidos inibidos são adicionados produtos químicos, tais como polímeros e/ou eletrólitos, que têm a função de retardar ou reduzir estes efeitos. Estes aditivos são conhecidos por inibidores. Os inibidores são adsorvidos sobre a superfície da rocha e impedem o contato direto com a água. Um exemplo típico de inibição é usado quando se perfura uma rocha salina. Ela

tem elevado grau de solubilidade em água doce, porém sua solubilidade fica reduzida quando empregamos um fluido salgado saturado com NaCl como meio dispersante.

Os fluidos de base água com baixo teor de sólidos são usados para aumentar a taxa de penetração da broca, reduzindo o custo total da perfuração. Já os emulsionados com óleo têm como objetivo principal reduzir a densidade do sistema para evitar que ocorram perdas de circulação em zonas de baixa pressão de poros ou de fratura.

### 2.3.2 Fluidos de base óleo

É classificado dessa forma quando a fase óleo, geralmente composta de hidrocarbonetos líquidos, é a fase contínua. A fase descontínua é composta por água e sólidos coloidais.

Algumas características:

- Baixa corrosão;
- Elevada lubricidade;
- Grau de inibição elevado em relação às rochas ativas;
- Baixa solubilidade de sais.

Algumas desvantagens em relação ao fluido base água:

- Menores taxas de penetração;
- Mais poluente;
- Maior custo;
- Dificuldade na detecção de gás no poço, devido a sua solubilidade na fase contínua;
- Dificuldade no combate à perda de circulação;
- Restrições para descarte de cascalhos no mar.

## 2.4 Reologia

Descreve a deformação de um corpo sob a influência de tensões.

### 2.4.1 Líquidos ideais

São líquidos que não possuem viscosidade, ou seja, deformam-se irreversivelmente (escoam). A energia requerida para a deformação é dissipada sob a forma de calor, e não pode ser recuperada pela remoção da tensão.

### 2.4.2 Tipos de Fluidos

Dependendo do comportamento de fluxo, os fluidos podem ser classificados em dois tipos:

- Fluidos Newtonianos
- Fluidos Não-Newtonianos

#### 2.4.2.1 Fluidos Newtonianos

São fluidos em que a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento, sendo a viscosidade a constante de proporcionalidade. Em outras palavras, a viscosidade permanecerá constante para qualquer taxa ou quantidade de deformação. Além disso, não apresentam limite de escoamento (tensão mínima necessária para que o fluido escoe).

$$\tau = \eta * \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento,  $\eta$  é a viscosidade e  $\dot{\gamma}$  é a taxa de cisalhamento.

### 2.4.2.2 Fluidos Não-Newtonianos

Todo fluido cuja relação entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento não é constante é denominado não-Newtoniano, considerando temperatura e pressão constantes.

- Viscosidade aparente:

É a viscosidade que o fluido teria se fosse Newtoniano naquela condição de fluxo, sendo explicitada a taxa de cisalhamento.

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.5)$$

### 2.4.3 Modelos reológicos

Existem diferentes modelos para descrever matematicamente os comportamentos dos fluidos indicados na Figura (2.2):

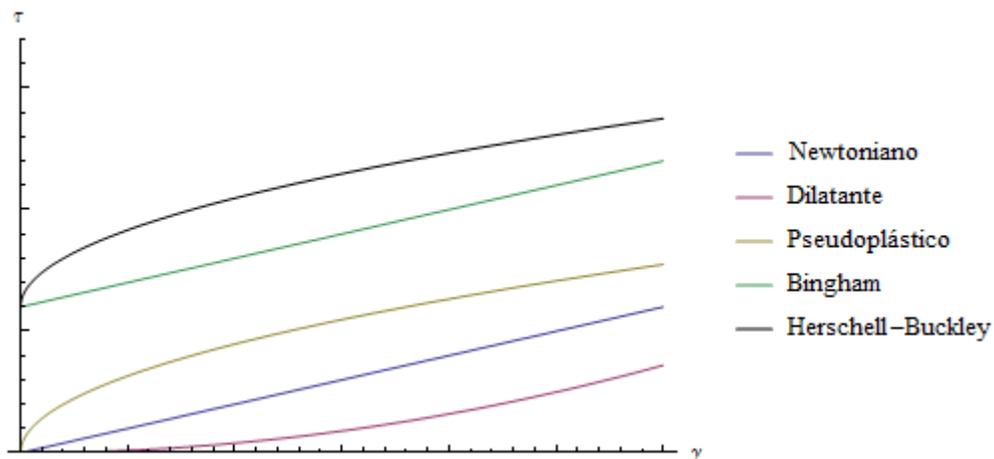


Figura 2.2 – Tipos de fluidos.

### 2.4.3.1 Modelo de Bingham ou Plástico Ideal

Neste modelo, para que haja o escoamento o fluido requer a aplicação de uma tensão mínima ( $\tau_e$ ), denominada limite de escoamento. A partir deste valor de tensão o fluido começa a fluir, sendo a tensão aplicada diretamente proporcional à taxa de cisalhamento, como nos fluidos Newtonianos.

$$\tau = \eta_p \dot{\gamma} + \tau_e \quad \text{para } \tau > \tau_e \quad (2.6)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{para } \tau < \tau_e \quad (2.7)$$

Quando submetidos a uma tensão menor que o limite de escoamento, os fluidos de Bingham, teoricamente, se comportam como sólidos, e em princípio só escoariam na forma de fluxo tampão.

- Viscosidade aparente:

$$\eta_a = \eta_p + \frac{\tau_e}{\dot{\gamma}} \quad (2.8)$$

Se a concentração de partículas dispersas aumenta, a viscosidade plástica ( $\eta_p$ ) aumenta.

Se as forças de atração interpartículas aumentam, o limite de escoamento aumenta.

### 2.4.3.2 Modelo de Ostwald de Waale ou Lei de Potência

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.9)$$

$0 < n < 1$  : *Fluido Pseudoplástico*

$n = 1$  : *Fluido Newtoniano*

$n > 1$  : *Fluido Dilatante*

- Viscosidade aparente:

$$\eta_a = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.10)$$

onde K é o índice de consistência do fluido, que indica o grau de resistência do fluido diante do escoamento e, n é o seu índice de comportamento, que por sua vez indica o grau de afastamento do fluido Newtoniano.

a) Fluidos Dilatantes

Apresentam viscosidade crescente com a taxa de cisalhamento. Neste caso, a agitação molecular leva à exposição de sítios de interação protegidos quando em repouso.

b) Fluidos Pseudoplásticos

Apresentam viscosidade decrescente com a taxa de cisalhamento. Neste caso, a agitação promove a ruptura ou desagregação das partículas e/ou moléculas, que em baixas taxas ocasionam viscosidades elevadas. Em contrapartida, com o aumento da taxa de cisalhamento, muitas partículas dispersas, lineares ou laminares, alinham-se na direção do fluxo, facilitando o deslizamento e reduzindo a viscosidade.

Em altas velocidades (taxas de cisalhamento), na coluna e na ponta da broca, o fluido apresenta baixas viscosidades, o que reduz as perdas de carga. Já em baixas velocidades de fluxo, no espaço anular, o fluido apresenta alta viscosidade, o que colabora para a limpeza do poço.

#### 2.4.3.3 Modelo de Herschel-Bulkley ou Lei de Potência Modificada

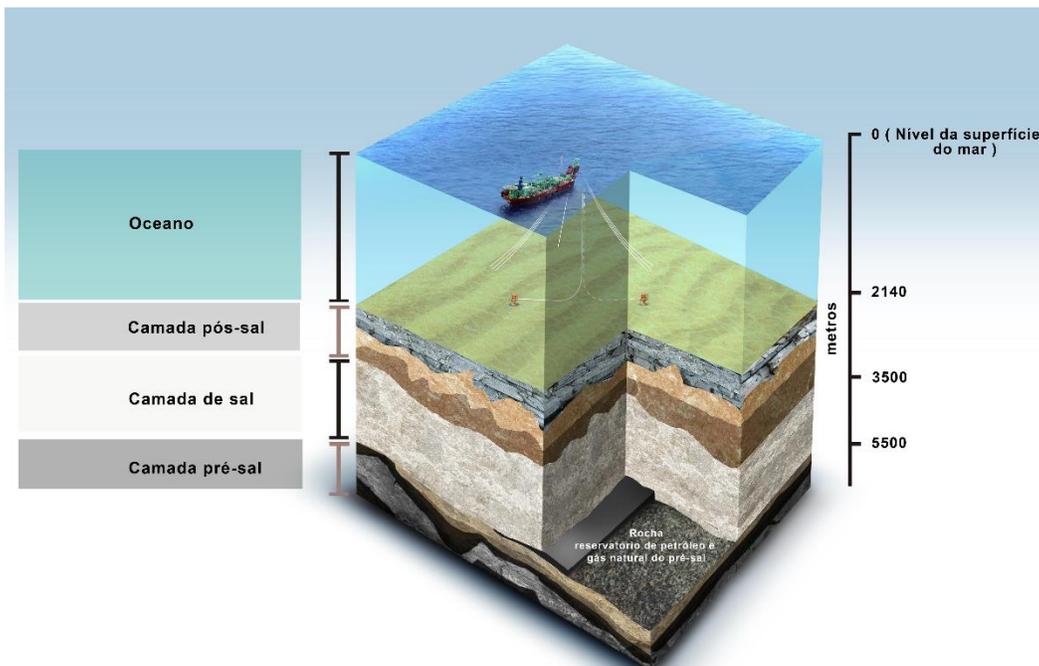
Este modelo é semelhante à lei de potência, já que a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento não variam de forma diretamente proporcional. Além de também possuir uma característica comum a outro modelo, o de Bingham, que considera a existência do limite de escoamento real dos fluidos.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n + \tau_e \quad (2.11)$$

- Viscosidade aparente:

$$\eta_a = K\dot{\gamma}^{n-1} + \frac{\tau_e}{\dot{\gamma}} \quad (2.12)$$

## 2.5 Perfuração de Sal



**Figura 2.3 – Seção que ilustra uma região que contém uma camada de sal.**  
(Fonte: <http://diariodopresal.wordpress.com/o-que-e-o-pre-sal/>)

### 2.5.1 Estrutura e Composição

Formações salinas são encontradas em muitas regiões produtoras de óleo. A química destes sais pode variar significativamente, desde NaCl puro até misturas complexas de cloretos.

Os principais tipos de sais são:

- Halita – NaCl
- Silvita – KCl
- Bischofita –  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$
- Carnalita –  $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$
- Polyhalita –  $K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$
- Tachydrita –  $CaCl_2 \cdot MgCl_2 \cdot 12H_2O$

Formações salinas geralmente contêm outros minerais do tipo evaporita, como anidrita ( $CaSO_4$ ), gypsum ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), kieserita ( $MgSO_4 \cdot H_2O$ ), calcário ( $CaCO_3$ ) ou dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ) associados em sua estrutura. Eles podem ser depositados no topo, ao redor ou entre a estrutura principal do sal.

## 2.5.2 Problemas

Muitos problemas podem ocorrer durante a perfuração de seções salinas, como por exemplo:

- Dissolução do sal, resultando no alargamento do poço:
  - Devido à subsaturação;
  - Devido à flutuações de temperatura.
- Deformação do sal, reduzindo o diâmetro do poço;
- Recristalização de sal e outros precipitados, emulsificantes e agentes de molhamento de fluidos de base orgânica e de base sintética, resultando em sólidos molháveis por água.

### 2.5.2.1 Dissolução – Alargamento do Poço

Fluidos de base aquosa devem ser saturados de acordo com a formação salina perfurada, de forma a minimizar a quantidade de sal dissolvida e resultante lavagem.

O alargamento do poço devido à dissolução não pode ser totalmente evitado com um fluido de base aquosa, mas pode ser minimizado a níveis aceitáveis.

A solubilidade de diferentes sais em um dado fluido controla a quantidade da formação que será dissolvida. Os cloretos de cálcio e magnésio são mais solúveis do que os cloretos de sódio e potássio. A importância da solubilidade relativa dos sais é tal que, em solução, o sal com a menor solubilidade precipitará primeiro.

Se uma solução saturada de cloreto de sódio for utilizada em um fluido para perfurar uma seção salina contendo cloreto de cálcio, este solubilizará, ao passo que o cloreto de sódio precipitará.

- Efeitos da Temperatura

Outro motivo para a dissolução dos sais está ligado à temperatura. A maioria dos sais é mais solúvel em temperaturas elevadas. Portanto, uma maior quantidade de sal será incorporada à solução em maiores temperaturas e profundidades.

À medida em que o fluido em circulação se aproxima da superfície, a temperatura diminui, cristalizando os sais, que serão removidos parcialmente pelos equipamentos de controle de sólidos. Em contrapartida, ao passo que a circulação continua, o fluido é reaquecido ao longo da descida e aumenta novamente a capacidade de sais serem incorporados à solução. Este ciclo de aquecimento e resfriamento é repetido em cada circulação, resultando em grande dissolução de sal e alargamento do poço.

Inibidores de cristalização química podem ser utilizados para manter a saturação no fundo do poço.

Esta alteração na solubilidade com a temperatura também indica que cristais de sal devem estar presentes na linha de fluxo quando se perfura sal. Se não houver cristais, o fluido provavelmente não estará saturado em altas profundidades.

#### 2.5.2.2 Deformação – Comportamento Plástico

Seções salinas exibem características plásticas quando submetidas à condições suficientes de temperatura e pressão.

Embora seja difícil correlacionar a magnitude requerida para iniciar a deformação plástica do sal devido à grande variedade de ambientes, é um fator conhecido que uma seção salina tende a ser mais sensível à temperatura e à pressão que formações adjacentes.

Formações salinas raramente apresentam características plásticas ou problemáticas se estiverem em profundidades menores que 5000 pés e em temperaturas inferiores à 200°F.

Quando um poço é perfurado através de uma seção salina, a tensão dentro do sal é aliviada e o sal flui através do poço.

Um sal pode fluir de tal forma a aprisionar e obstruir os equipamentos de perfuração. Para a correção deste problema, água doce pode ser utilizada para dissolver o sal que fluiu, liberando as ferramentas.

#### 2.5.2.3 Recristalização

É o resultado da diminuição de temperatura de uma solução supersaturada de sal ou pela introdução de um sal mais solúvel. Sendo o sal menos solúvel, o primeiro a recrystalizar.

Um problema referente à cristalização é que a massa de pequenos cristais apresenta uma grande área específica, que é preferencialmente molhável por água.

Em fluidos de base óleo, estas partículas adsorvem rapidamente os agentes de molhamento e os emulsificantes, resultando em instabilidade do fluido.

O crescimento de um cristal tem início com um sítio de nucleação, que pode ser a superfície de um sólido perfurado, do revestimento, ou do próprio equipamento de controle de sólidos.

Além de o sal recristalizar como partículas individuais, pode também recristalizar no fundo do poço como grandes aglomerados.

Em alguns casos pode ocorrer precipitação no revestimento, dificultando consideravelmente a retirada da broca do poço. Esta massa de sal pode ser removida com lavagens de água doce.

Em alguns locais de clima frio, a diferença de temperatura é tamanha entre a superfície e o fundo do poço que isso pode levar à recristalização. Uma alternativa consiste na utilização de fluidos aquecidos na superfície, de modo a manter o fluido em condição de saturação, prevenindo a recristalização.

Inibidores de precipitação de sal são algumas vezes utilizados em fluidos de base aquosa para prevenir a recristalização mantendo a supersaturação da salmoura. Estes materiais interferem na estrutura de formação do cristal. Eles, geralmente, somente aumentam o ponto de saturação da salmoura, mas não resolvem por completo o problema da recristalização.

### 2.5.3 Opções de Fluidos de Perfuração de Base Água

#### 2.5.3.1 Fluido Saturado de Sal

Fluidos de base água devem ser projetados para serem compatíveis com o sal a ser perfurado. É importante manter o sistema completamente saturado principalmente no momento em que o sal é perfurado, para prevenir um alargamento excessivo.

#### 2.5.3.2 Sistemas Levemente Subsaturados

Em algumas áreas seu uso tem sido aperfeiçoado de tal forma que a taxa de dissolução é altamente controlada. Uma dificuldade desta abordagem é que para trechos longos de sal a taxa de dissolução pode variar consideravelmente do topo ao fundo, e o fluido no espaço anular pode se tornar saturado na ponta da broca de tal forma que não se consiga dissolver os cascalhos salinos durante a circulação. Portanto, este método é indicado para seções de sal curtas.

Este sistema leva à um pequeno alargamento do poço, evitando que a deformação do sal leve à obstrução do mesmo.

- a) Vantagens dos fluidos de base água saturada em relação aos fluidos sintéticos:
- Possuem um custo baixo;
  - Formulação mais simples;
  - Boa estabilidade reológica;
  - Facilidade de descarte.
- b) Desvantagens dos fluidos de base aquosa saturada em relação aos fluidos sintéticos:
- Solubilidade aumenta com a temperatura;

- Alto potencial de corrosão;
- Grandes quantidades de sal para atingir a saturação.

Uma importante vantagem que será detalhadamente tratada neste trabalho é que à medida que a partícula de sal dissolve no fluido, ela diminui de tamanho, fazendo com que sua velocidade de sedimentação também diminua. Com isso, a velocidade de transporte da mesma para a superfície aumenta. Aumentando também a razão de transporte. Ou seja, a eficiência da limpeza do poço é otimizada com a dissolução de sal no fluido. Para que essa situação ocorra, é necessário a utilização de um fluido base água levemente subsaturado de sal no fundo do poço. Portanto, é justamente com este tipo de fluido que serão feitas todas as simulações dessa pesquisa.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta diversos estudos passados sobre o transporte de cascalhos para poços verticais e desviados, o que comprova a importância dessa operação durante a perfuração.

Os modelos existentes para a solução dos problemas envolvendo o transporte de cascalhos e limpeza do poço pareciam ser ineficientes. Portanto, muitos dos modelos foram desenvolvidos recentemente, como se pode observar a seguir.

Em 1983, HUSSAINI e AZAR conduziram um estudo experimental sobre o comportamento de cascalhos no anular de um poço vertical. Eles focaram no estudo dos efeitos de vários fatores como a velocidade no anular, viscosidade aparente, limite de escoamento para a razão de viscosidade plástica e o efeito do tamanho da partícula na capacidade de carregamento de fluidos de perfuração. Outro objetivo era verificar o modelo de transporte de Ziedler usando fluidos atuais. Foi concluído que a velocidade do fluido no anular tinha um efeito importante na capacidade de carregamento dos fluidos, enquanto outros parâmetros tinham uma menor importância. Eles foram capazes também de concluir que a equação da concentração de partículas no anular de Ziedler era válida para fluidos de perfuração.

Em 1990, SÁ realizou um estudo experimental dos efeitos de parede, da concentração de partículas e da reologia em um escoamento axial anular de um sistema partícula-fluido não-Newtoniano. Para o efeito de concentração de partículas, foi conseguida uma correlação em função da razão entre os diâmetros da partícula e hidráulico do espaço anular, e do número de Reynolds, utilizando a lei de potência e o modelo de Ellis como modelos reológicos. Com estes mesmos modelos, foi possível relacionar o efeito de parede com grupos adimensionais relevantes. Levando-se em conta estes efeitos foram

simulados suas influências no transporte de cascalhos. Foi constatado também que quanto maior a viscosidade do fluido, maior será a razão de transporte para uma dada vazão de circulação, como era de se esperar.

Em 1994, LUO et al. apresentaram uma técnica gráfica simples para determinar os requisitos para limpeza do poço para uma variedade de tamanhos de poços. Além disso, o método foi apresentado por um conjunto de gráficos que foram ajustados para vários tamanhos de poços e foram validados para as condições de perfuração do Mar do Norte. Estes gráficos incluíam variáveis como a vazão de fluido, a taxa de penetração, viscosidade do fluido, peso da lama e regimes de fluxo. Para simplificar o estudo, foi decidido por ignorar algumas variáveis como a excentricidade da perfuração, a densidade dos cascalhos e o tamanho dos cascalhos. Uma conclusão importante foi que os gráficos indicavam que o efeito da viscosidade da lama dependia do regime de fluxo.

Ainda em 1994, BELAVADI e CHUKWU fizeram um estudo experimental sobre o transporte de cascalhos onde estudaram os parâmetros que afetam este transporte em um poço vertical. Para isso, uma unidade de simulação foi construída e o transporte de cascalhos no anular foi observado. Os dados coletados dessa simulação foram correlacionados graficamente em uma forma adimensional versus a razão de transporte. O resultado dessa análise mostrou que a razão das diferenças de densidade entre os cascalhos e o fluido de perfuração tinha um efeito importante no transporte dos cascalhos. Eles concluíram que um aumento na vazão do fluido iria aumentar o transporte de cascalhos no anular, quando a densidade do fluido for alta. Em contrapartida, quando a densidade do fluido for baixa, esse efeito é negligenciado quando os cascalhos tiverem um diâmetro grande. Eles concluíram que o transporte de pequenos cascalhos iria aumentar, quando tanto a rotação da coluna de perfuração quanto a densidade do fluido forem altas.

No mesmo ano, CLARK e BICKHAM desenvolveram um novo modelo que permitiria concluir uma análise para o transporte de cascalhos para todo o poço, da superfície até a broca. Esse modelo foi desenvolvido para os vários modos de transporte de partícula: sedimentação, elevação e rolamento, onde cada modo de transporte era dominante dentro de um certo intervalo de ângulos do poço. O modelo foi mais tarde comparado com dados experimentais e mostrou uma boa concordância. A versão computacional do modelo foi usada para examinar situações onde um precário transporte dos cascalhos causavam problemas na perfuração. Portanto, esse modelo foi útil para identificar possíveis soluções e para a criação de trajetos que possibilitem uma ótima limpeza do poço.

Em 1995, GUILD et al. apresentaram um programa para limpeza do poço. O objetivo desse programa era melhorar o desempenho das perfurações de longo alcance, evitando a prisão de colunas e poços apertados, e maximizando o desempenho da perfuração diariamente. Foi concluído que monitorando o torque e o arraste o desempenho melhoraria. Esse programa também contribuiu para o desempenho da perfuração melhorando o entendimento geral da limpeza do poço.

Em 1996, MARTINS et al. fizeram um estudo experimental sobre a dependência do fator de fricção interfacial no número de Reynolds, na razão entre os diâmetros da partícula e hidráulico, e no índice de comportamento em leito horizontal de cascalhos. Os experimentos consistiam na visualização da erosão de leitos de arenito por diferentes soluções poliméricas que fluem através de uma seção anular. Um conjunto de correlações foi desenvolvida para a previsão do fator de fricção interfacial e forças estáticas máximas de um sistema sólido e fluido não-Newtoniano. Essas correlações foram bastante úteis para o desenvolvimento de modelos baseados fisicamente para a avaliação do transporte de cascalhos.

No mesmo ano, HEMPHILL e LARSEN realizaram uma pesquisa experimental onde a eficiência da água e fluidos base óleo na limpeza de poços inclinados em diferentes velocidades do fluido foram estudadas. Durante a pesquisa, as seguintes definições foram estabelecidas: vazão crítica definida como a velocidade de fluxo em que o leito de cascalhos começa a ser formado, vazão subcrítica definida como a velocidade do fluido que é mais baixa que a vazão crítica. Nesse caso, cascalhos se acumulam no anular.

Muitas conclusões importantes sobre o desempenho de fluidos de perfuração foram feitos no final deste estudo. Primeiro, a velocidade do fluido era de suma importância para a limpeza do poço em anulares inclinados. Segundo, o papel do peso da lama era menos significativo que o papel da velocidade do fluido. Das observações, afirmou-se que fluido base óleo não limpa o poço tão bem quanto fluido base água quando eles foram comparados sob condições de vazão crítica e fluxo subcrítico. Outros parâmetros, como a densidade da lama e o índice de fluxo “n” poderiam afetar o transporte de cascalhos em certos intervalos de ângulo do poço.

Em 1997, AZAR e SANCHEZ discutiram sobre fatores que tinham influência na limpeza do poço e suas limitações no campo. A discussão focou no seguintes fatores: velocidade do fluido no anular, ângulo de inclinação do poço, rotação da coluna de perfuração, excentricidade do anular, taxa de penetração, e características de cascalhos perfurados. Algumas conclusões importantes foram tiradas. A limitação em todos esses fatores afetam a limpeza do poço que existiam, e portanto um planejamento cuidadoso e considerações simultâneas nessas variáveis foram necessárias. Foi provado novamente que a limpeza do poço em poços desviados era um problema complexo e, por isso, muitos assuntos na pesquisa e na metodologia deveriam ser abordados antes de uma solução universal para os problemas de limpeza do poço ser apresentada.

No mesmo ano, BLACKERY et al. tinham como propósito fornecer resultados para o movimento de uma esfera sólida através de um fluido viscoplástico contido em um tubo cilíndrico para diferentes razões de diâmetros do tubo e da esfera, e também calcular o coeficiente de arraste para fluidos tipo Bingham. Foi utilizado o método de elementos finitos para a solução numérica do problema que envolvia uma esfera fixa e um escoamento de fluido viscoplástico em torno dela. O estudo confirmou estudos passados com fluidos tipo Bingham em relação à um forte aumento do coeficiente de arraste quando o número de Bingham aumenta.

Em 1998, PHILIP et al. fizeram uma tentativa determinística a fim de estabelecer se vórtices influenciariam no transporte de cascalhos, e se sim, qual fluido e propriedades do sistema deveriam ser preservados de modo que os vórtices iriam aparecer no sistema. Para isso, diversos experimentos com uma vasta gama de fluidos newtonianos e fluidos lei de potência em uma geometria anular transparente foi realizada. Durante o estudo, foi observado que os vórtices de Taylor contribuíram para a elevação dos cascalhos e auxiliaram para um melhor transporte dos fragmentos de rocha. Em fluidos newtonianos, a viscosidade do fluido aumentava e, por isso, melhorava a capacidade de elevação dos cascalhos. Em fluidos lei de potência, fluidos com altos valores de “n” foram mais efetivos para o transporte dos cascalhos. Esse estudo mostrou que fluidos com altos valores de “K” resultavam em uma melhor suspensão dos cascalhos e melhoravam o transporte dos mesmos. O experimento provou que fluidos newtonianos tinham uma capacidade maior para o transporte dos cascalhos do que fluidos pseudoplásticos com uma viscosidade aparente similar. Dos resultados teóricos e experimentais, foi indicado que os vórtices de Taylor poderiam se formar em todos os tipos de fluidos, mesmo na taxa de rotação mais baixa (40 rpm).

Em 1999, PILEHVARI et al. apresentaram uma visão geral dos desenvolvimentos no transporte de cascalhos ao longo dos anos, as deficiências do seu estado atual, e recomendações para futuras pesquisas foram dadas. Os cientistas focaram em estudos experimentais pioneiros apresentados em 1986-1991. Além disso, eles revisaram o número de pesquisas iniciadas por várias empresas petrolíferas durante a década de 80. A maior parte do levantamento apresentado era focado na aproximação empírica e modelos/correlações que foram desenvolvidos a partir de investigações nos anos 90. No final desta revisão, um resumo das diretrizes foram apresentadas para uma eficaz limpeza do poço.

Ainda nesse ano, CHHABRA publicou um livro que enfoca no fluxo de fluidos não-Newtonianos em processos industriais. Muitos dos assuntos abordados por ele tem a ver com o presente trabalho, especialmente o capítulo cinco que trata de sistemas particulados. Este capítulo fornece uma visão geral dos desenvolvimentos no campo de sistemas fluido-partícula. É apresentado como a ação do fluido em movimento influencia na separação de partículas de diferentes tamanhos e formas. São feitas considerações acerca da força de arraste, efeitos de parede e população, e velocidade de sedimentação de partículas e bolhas em diferentes tipos de fluidos não-Newtonianos

Em 2003, LI e KURU desenvolveram um modelo unidimensional bifásico para simular o transporte de cascalhos com espuma em poços verticais. O modelo foi resolvido numericamente a fim de prever uma vazão ótima de espuma e propriedades reológicas para maximizar a eficiência do transporte de cascalhos nos poços verticais. Muitas conclusões foram feitas. Primeiro, previsões do modelo de pressões de fundo do poço flutuantes para fluxo de espuma em acordo suficiente com os dados de campo. Segundo, diversas observações sobre a qualidade da espuma foram feitas. O efeito da qualidade da espuma na pressão de fundo de poço foi também estabelecida. O modelo desenvolvido

poderia ser usado para escrever programas computacionais para fins de projetos práticos bem como desenvolver diretrizes para especialistas de campo para uso em controle operacional do transporte de cascalhos com espuma.

Em 2004, YU et al. apresentaram um estudo sobre a melhora na capacidade de transporte de cascalhos de fluidos de perfuração em poços horizontais com a ligação de bolhas de ar na superfície de cascalhos perfurados usando surfactantes químicos. Os experimentos laboratoriais foram apresentados a fim de determinar os efeitos dos surfactantes na ligação de bolhas de ar em cascalhos. O estudo revelou que o uso de certos surfactantes poderia aumentar a força da ligação entre as bolhas de ar e os cascalhos e, provou que este método poderia melhorar gradualmente a capacidade de transporte de cascalhos em poços horizontais e inclinados.

Em 2007, TABUTEAU et al. fizeram um trabalho experimental sobre a força de arraste em partículas esféricas em fluido viscoplástico ao longo de uma vasta gama de parâmetros juntamente com uma análise reológica cuidadosa. Eles mediram a variação da velocidade com o tempo para esferas de diferentes densidades caindo em géis de Carbopol. Nenhum movimento foi observado para as densidades mais baixas em estado estacionário. Eles foram capazes de distinguir o movimento constante (velocidade terminal constante) do movimento que envolve uma desaceleração progressiva em longos períodos, e determinar o critério de escoamento de forma precisa. Os resultados experimentais tiveram uma boa concordância com trabalhos teóricos passados.

Em 2008, PINTO estudou a cinemática da partícula em fluidos de viscosidade variável com o tempo durante paradas operacionais. Por meio de experimentos de sedimentação, foi validada uma correlação para a velocidade de sedimentação de partículas sólidas,

aplicando-se as correções para viscosidade efetiva que é função da taxa de deformação e do tempo.

## 4 FORMULAÇÃO

Neste item apresentou-se a modelagem matemática da dissolução de partículas de sal no escoamento em um fluido de perfuração.

A partir do momento em que uma partícula sólida insolúvel proveniente da formação entra em contato com o fluido de perfuração, ela acelera até atingir a velocidade terminal, que ocorre quando o empuxo e a força de arraste se igualam ao seu peso, devido à ação do campo gravitacional. Nesse momento, sua velocidade se torna constante e atinge seu valor máximo.

Entretanto, neste caso em que a partícula é solúvel, a velocidade terminal nunca é atingida. Para isso será preciso analisar o efeito do termo de inércia no balanço de forças para saber qual sua influência na velocidade de sedimentação da partícula.

Por meio da análise dinâmica de uma partícula esférica sólida (fase discreta) totalmente submersa em um fluido pseudoplástico, em que:

$$\rho_p > \rho_f$$

onde  $\rho_p$  e  $\rho_f$  são as massas específicas da partícula e do fluido, respectivamente.

Conforme demonstrado no diagrama de corpo livre da figura (3.1):



Figura 4.1 – Diagrama de corpo livre.

E de acordo com a segunda lei de Newton, temos:

$$\sum F = m_p \frac{dv}{dt} \quad (4.1)$$

onde  $m_p$  é a massa e  $dv/dt$  é a aceleração da partícula.

É representado o balanço de forças relativo ao diagrama em questão da seguinte forma:

$$P - F_a - E = m_p \frac{dv}{dt} \quad (4.2)$$

Em um primeiro momento será analisado o comportamento da velocidade de sedimentação sem a influência do termo de inércia, ou seja, considerando que a aceleração da partícula pode ser desprezada por não influir significativamente no valor da velocidade. Com isso, a equação para a partícula esférica sólida fica assim:

$$P - F_a - E = 0 \quad (4.3)$$

O peso da esfera (P) é definido como:

$$P = m_p g \quad (4.4)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade.

O empuxo (E) que o fluido exerce sobre a partícula, considerando que o volume da partícula é igual ao volume de fluido deslocado, é:

$$E = \rho_f g V_p \quad (4.5)$$

onde  $V_p$  é o volume da partícula esférica, que é definido como:

$$V_p = \frac{\pi d_p^3}{6} \quad (4.6)$$

E, finalmente, para o cálculo da força de arraste é utilizada a seguinte equação por definição:

$$F_a = \frac{\rho_f v_\infty^2 A C_D}{2} \quad (4.7)$$

onde  $v_\infty$  é a velocidade de sedimentação da partícula isolada,  $C_D$  é o coeficiente de arraste e  $A$  é uma área característica, que é a área da seção transversal da esfera, que é dada por:

$$A = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (4.8)$$

Substituindo a equação da área característica (4.8) na da força de arraste (4.7), temos:

$$F_a = \frac{\rho_f v_\infty^2 \pi d_p^2 C_D}{8} \quad (4.9)$$

Substituindo as equações do peso da esfera (4.4), do empuxo (4.5) e da força de arraste (4.9) em (4.3), obtemos:

$$m_p g - \frac{\rho_f v_\infty^2 \pi d_p^2 C_D}{8} - \rho_f g V_p = 0 \quad (4.10)$$

Porém,

$$m_p = \rho_p V_p \quad (4.11)$$

Substituindo a equação da massa da partícula (4.11) em (4.10), temos:

$$\rho_p V_p g - \frac{\rho_f v_\infty^2 \pi d_p^2 C_D}{8} - \rho_f g V_p = 0 \quad (4.12)$$

Substituindo a equação do volume da partícula esférica (4.6) em (4.12), temos:

$$\frac{g \pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_f) - \frac{\rho_f v_\infty^2 \pi d_p^2 C_D}{8} = 0 \quad (4.13)$$

Resolvendo para a velocidade de sedimentação, se chega a seguinte fórmula:

$$v_{\infty} = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho_f)d_p}{3\rho_f C_D}} \quad (4.14)$$

Lembrando que a equação (4.14) é a primeira das duas fórmulas que teremos para o cálculo da velocidade de sedimentação da partícula.

Então, a partir da equação (4.2), que leva em consideração a aceleração da partícula no cálculo da velocidade de sedimentação da mesma, e fazendo as devidas substituições chegamos a seguinte fórmula:

$$\frac{d(v_{\infty})}{dt} = \frac{g(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} - \frac{3\rho_f v_{\infty}^2 C_D}{4\rho_p d_p} \quad (4.15)$$

Podemos notar que enquanto a equação (4.14) tem solução analítica, a equação (4.15) tem uma solução numérica diferencial. Mais à frente veremos se há diferença entre as soluções.

Um aspecto importante a ser observado a partir de ambas as equações é que a força motriz para o atraso no transporte da partícula em relação ao fluido é a diferença entre as massas específicas. Adicionalmente, a viscosidade do fluido governa a cinética do transporte (oferecendo maior ou menor resistência à deposição).

Estas duas equações não são definitivas para o conhecimento do comportamento da velocidade de sedimentação da partícula imersa em um fluido de base água, já que a partícula do presente estudo é salina (solúvel). Então, ainda é preciso que seja obtida uma equação para o decaimento do diâmetro da partícula de sal, além de uma equação para o cálculo do seu coeficiente de arraste. Os próximos tópicos abordam justamente estes dois problemas.

#### 4.1 Cálculo do coeficiente de arraste

O coeficiente de arraste pode ser calculado por meio da velocidade terminal da partícula, ou seja, a velocidade constante que é atingida pela partícula quando lançada no fluido inicialmente em repouso.

Por meio da fluidodinâmica da partícula esférica isolada, são utilizadas neste trabalho, as correlações de COELHO e MASSARANI (1996) com base nos dados de LAPPLE e SHEPHERD (1940) e PETTYJOHN e CHRISTIANSEN (1948) para o cálculo do coeficiente de arraste em fluido newtoniano.

Essa correlação é válida para:

$$Re < 5.10^4$$

sendo  $Re$ , o número de Reynolds, que é definido pela seguinte fórmula:

$$Re = \frac{\rho_f v_t d_p}{\eta_a} \quad (4.16)$$

onde  $\eta_a$  é a viscosidade aparente do fluido e  $v_t$  é a velocidade de transporte da partícula, definida na equação (2.1).

Com isso, podemos calcular o coeficiente de arraste, definido da seguinte maneira:

$$C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^{0,63} + 0,43^{0,63} \right]^{\frac{1}{0,63}} \quad (4.17)$$

#### 4.2 Cálculo do decaimento do diâmetro da partícula com o tempo

A etapa seguinte seria caracterizar a sedimentação de uma partícula solúvel no fluido e, conseqüentemente seu diâmetro seria reduzido com o tempo.

De acordo com AKSEL'RUD et al. (1992), é feito o seguinte balanço de massa em uma partícula solúvel isolada imersa em um fluido.

$$\frac{d(m_p)}{dt} = -ka(C^* - C) \quad (4.18)$$

onde  $t$  é o tempo,  $k$  é o coeficiente de transferência de massa,  $C^*$  é a concentração da saturação de NaCl em água,  $C$  é a concentração instantânea da solução e  $a$  é a área superficial da partícula esférica, definida da seguinte maneira:

$$a = \pi d_p^2 \quad (4.19)$$

Substituindo a equação da massa da partícula (4.11) e de sua área superficial (4.19) em (4.18), temos:

$$\rho_p \frac{d(V_p^3)}{dt} = -k\pi d_p^2 (C^* - C) \quad (4.20)$$

Substituindo agora a equação do volume da partícula (4.6) em (4.20), temos:

$$\rho_p \frac{\pi d(d_p^3)}{6 dt} = -k\pi d_p^2 (C^* - C) \quad (4.21)$$

Juntando os parâmetros de valor constante para simplificar a equação, obtemos:

$$\frac{d(d_p^3)}{dt} = -bd_p^2 \quad (4.22)$$

onde  $b$  é uma constante definida da seguinte forma:

$$b = k \frac{6}{\rho_p} (C^* - C) \quad (4.23)$$

Para facilitar a integração, é feita a seguinte substituição:

$$y = d_p^3 \quad (4.24)$$

Fazendo a equação (4.22) se transformar na seguinte equação:

$$\frac{dy}{dt} = -by^{\frac{2}{3}} \quad (4.25)$$

Integrando, temos:

$$3y^{\frac{1}{3}} = -bt + C1 \quad (4.26)$$

onde C1 é a constante de integração.

Substituindo de volta para  $d_p$ , obtemos:

$$3d_p = -bt + C1 \quad (4.27)$$

Para se obter o valor de C1 é necessário a utilização da condição inicial. É sabido o diâmetro inicial da partícula no tempo zero, ou seja, o diâmetro antes de a partícula entrar em contato com o fluido:

$$\text{Condição Inicial: } d_p = d_{p_0} \text{ em } t = 0$$

Com isso, o valor da constante de integração é agora conhecido:

$$C1 = 3d_{p_0} \quad (4.28)$$

E a equação fica assim definida:

$$d_p = -\frac{bt}{3} + d_{p_0} \quad (4.29)$$

Substituindo de volta o valor de  $b$ , obtemos:

$$d_p = d_{p_0} - 2\frac{k}{\rho_p}(C^* - C)t \quad (4.30)$$

### 4.3 Influência da concentração de partículas

A velocidade terminal de uma partícula tem seu valor bastante reduzido pela presença de outras partículas no meio onde ela se encontra. Quanto maior for a concentração de sólidos no fluido, maior será essa redução.

Neste estudo, será utilizada a correlação de RICHARDSON e ZAKI (1954) para a correção da velocidade de sedimentação de partículas arredondadas. Em que  $U$  é a velocidade corrigida.

$$\frac{U}{v_{\infty}} = f(Re, \varepsilon) \quad (4.31)$$

onde  $\varepsilon$  é a fração volumétrica de fluido na suspensão.

$$\varepsilon = 1 - cv \quad (4.32)$$

onde  $cv$  é a fração volumétrica da fase sólida logo acima da broca na suspensão.

Segue a correlação:

$$\frac{U}{v_{\infty}} = \varepsilon^m \quad (4.33)$$

onde  $m$  é função de  $Re_{\infty}$ .

**Tabela 4.1 – Valores de  $m$  de acordo com o número de Reynolds.**

$Re_{\infty}$	<0.2	0,2-1	1-500	>500
$m$	3,65	$4,35Re_{\infty}^{-0,03} - 1$	$4,45Re_{\infty}^{-0,1} - 1$	1,39

### 4.4 Influência da presença de fronteiras rígidas

A fluidodinâmica da partícula é influenciada pela presença de fronteiras rígidas. O efeito delas resulta em uma redução na velocidade terminal da partícula isolada ( $v_{\infty}$ ).

Neste estudo são utilizadas as correlações de ALMEIDA (1995) para o cálculo do efeito de parede na fluidodinâmica da partícula isométrica, isto é, partícula esférica ou na forma de poliedro regular. Vale salientar que as correlações clássicas de FRANCIS (1933), regime de Stokes, e de MUNROE (1888), regime de Newton, válidas para esferas, podem ser utilizadas também para partículas isométricas.

Para a utilização desse modelo é necessário que a partícula esteja em uma faixa de esfericidade,  $\Phi$ , entre 0,65 e 1 e que a razão entre o diâmetro da partícula e o diâmetro do tubo,  $d_p/d_t$ , esteja em uma faixa entre zero e 0,5.

A velocidade corrigida para o efeito de parede ( $v_w$ ) se relaciona com a velocidade terminal da partícula isolada ( $v_\infty$ ) da seguinte maneira:

$$\frac{v_w}{v_\infty} = k_p \quad (4.34)$$

onde  $k_p$  é o fator de correlação da velocidade com fronteiras rígidas.

Para  $Re_\infty < 0,1$ , FRANCIS (1933) propôs a seguinte correlação:

$$k_p = \left( \frac{1-\beta}{1-0,475\beta} \right)^4 \quad (4.35)$$

Para  $Re_\infty > 1000$ , MUNROE (1888) propôs:

$$k_p = 1 - \beta^{1,5} \quad (4.36)$$

Para uma região intermediária,  $0,1 < Re_\infty < 1000$ , ALMEIDA (1995) propôs:

$$k_p = \frac{10}{1+ARe_\infty^B} \quad (4.37)$$

Em que:

$$A = 8,91e^{2,79\beta} \quad (4.38)$$

$$B = 1,17 * 10^{-3} - 0,281\beta \quad (4.39)$$

$$\beta = d_p/d_h \quad (4.40)$$

onde  $d_h$  é o diâmetro hidráulico, e sua fórmula está definida a seguir:

$$d_h = 0,816(d_e - d_i) \quad (4.41)$$

sendo que  $d_e$  é o diâmetro do poço e  $d_i$  é o diâmetro externo do tubo.

## 5 RESULTADOS TÉCNICOS DA SIMULAÇÃO

Por meio da utilização do software “Wolfram Mathematica” foram feitas simulações para o estudo do comportamento de partículas salinas imersas em um fluido de perfuração de base água. Com a simulação foi possível entender como o diâmetro da partícula decai com o tempo, tendo em vista que ela dissolve a partir do momento que ela se desprende da formação. Este fenômeno interfere na sua velocidade de sedimentação e, logo, na sua velocidade de transporte para a superfície. Ainda é importante que se mencione que a dissolução da partícula no fluido também influencia o seu coeficiente de arraste, já que ele é dependente do número de Reynolds, que depende do diâmetro e velocidade da partícula. Logo, foi necessária a elaboração de um método iterativo para a solução do problema proposto. Foram analisadas também a influência da concentração de partículas no fluido e o efeito de fronteiras rígidas.

Todas as simulações do presente estudo foram realizadas de acordo com as seguintes hipóteses:

- Fluido de perfuração não-Newtoniano, pseudoplástico e incompressível, que está em constante circulação;
- Partículas salinas esféricas com diâmetro inicial de 0,15 polegadas;
- A Halita – NaCl - é o sal da formação;
- Temperatura constante de 30°C;
- O modelo reológico é a lei de potência, o qual não considera limite de escoamento na sua formulação. A estimativa do limite de escoamento é superestimada devido à limitações do reômetro. Assim, o uso do modelo escolhido se mostra mais conservador.
- Números de Reynolds menores que trinta.

## 5.1 Comportamento do diâmetro variável com o tempo

Para efeitos de cálculo, foi desconsiderada que a concentração instantânea de NaCl na solução,  $C$ , varie com o tempo, na medida em que os dados contidos para a sua incorporação na equação gerou resultados muito próximos de uma concentração constante, a qual foi utilizada nesta simulação.

Além disso, a simulação é feita considerando um sistema isotérmico. Contudo, a concentração da saturação de NaCl em água tem uma dependência significativa com a temperatura.

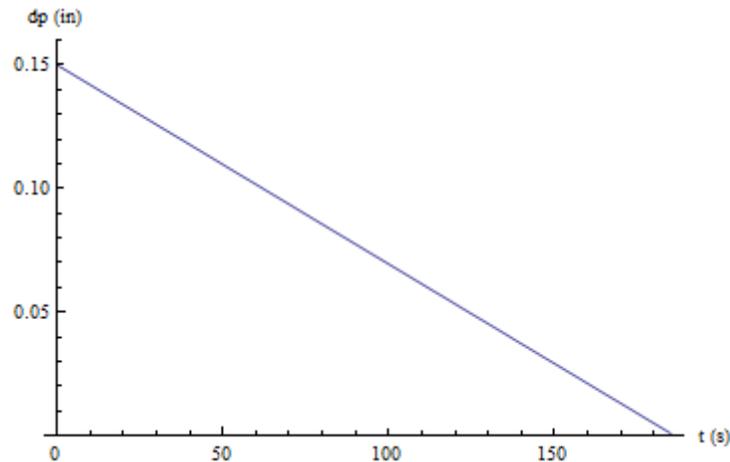
A equação (4.30) tem solução analítica. O programa Mathematica solucionou-a de forma direta, entrando-se com o valor dos parâmetros referentes à partícula, seu diâmetro inicial, sua massa específica e seu coeficiente de transferência de massa, além das concentrações da saturação e instantânea de NaCl na solução, ele retorna o gráfico do diâmetro variável com a dissolução da partícula.

Por meio da equação (4.30), que se refere ao decaimento do diâmetro da partícula com o tempo, e com o auxílio da tabela (5.1), que mostra os valores dos parâmetros utilizados na simulação:

**Tabela 5.1 – Dados para o cálculo do diâmetro da partícula variável com o tempo.**

Parâmetro	$k$ (m/s)	$d_{p0}$ (in)	$C^*$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> )
Valores	$10^{-4}$	0,15	315,15	90	2200

Pôde-se chegar ao resultado do comportamento do diâmetro da partícula com o tempo, mostrado na figura (5.1).



**Figura 5.1 – Diâmetro da partícula (in) x Tempo (s).**

A partícula se desprende da parede do poço com um diâmetro inicial de 0,15 polegadas e se dissolve, por completo, em aproximadamente, 185 segundos.

Algumas observações importantes foram concluídas a partir deste resultado:

- Quanto maior for o diâmetro inicial da partícula salina maior será o seu tempo de dissolução;
- Quanto maior for a concentração instantânea de sal na solução maior será o tempo de dissolução da partícula;
- Um maior coeficiente de transferência de massa gera um menor tempo de dissolução;
- E uma partícula de maior massa específica demora mais tempo até se dissolver por completo.

É importante ter em mente que a influência de cada parâmetro foi medida separadamente, sendo que na realidade eles são dependentes entre si, ou seja, quando mudamos o tipo de partícula, o seu diâmetro inicial, seu coeficiente de transferência de massa e sua massa específica são alterados simultaneamente. Por falta de dados experimentais de

outros tipos de sais que determinassem os seus parâmetros, a análise foi feita sem considerar essa dependência.

## 5.2 Comparação das soluções com e sem o termo de inércia

Como explicado anteriormente, a velocidade terminal da partícula não é atingida porque ela é solúvel no fluido de perfuração, o que será mostrado nesta seção.

Em um primeiro momento, iremos comparar as soluções das equações da velocidade de sedimentação da partícula sem considerar o termo de inércia, equação (4.14), e com o termo de inércia, equação (4.15).

Os dados para o cálculo da velocidade de sedimentação da partícula, a partir das equações (4.14) e (4.15), estão apresentados na tabela (5.2).

**Tabela 5.2 – Dados para o cálculo da velocidade de sedimentação da partícula.**

Parâmetro	g (m/s <sup>2</sup> )	$\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$K$ (Pa.s <sup>n</sup> )	n	$Q_f$ (gpm)	$d_e$ (in)	$d_i$ (in)
Valor	9,81	2200	1199	2,63	0,6	900	17,5	5

Com os dados da tabela (5.2) e a equação do diâmetro (4.30) resolvida, é necessário, ainda, incorporarmos a equação do coeficiente de arraste (4.17) para a solução da velocidade de sedimentação da partícula.

A equação (4.17) é dependente do número de Reynolds (4.16), que por sua vez é dependente das equações (2.1) e (2.10). Portanto, iremos substituir essas duas últimas equações em (4.16). O que resulta em:

$$Re = \frac{\rho_f(v_f - v_p)d_p}{K\dot{\gamma}^{n-1}} \quad (5.1)$$

A taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) em relação à partícula é definida à seguir:

$$\dot{\gamma} = \frac{(v_f - v_p)}{d_p} \quad (5.2)$$

E a velocidade do fluido ( $v_f$ ) é determinada da seguinte maneira:

$$v_f = \frac{4Q_f}{\pi(d_e^2 - d_i^2)} \quad (5.3)$$

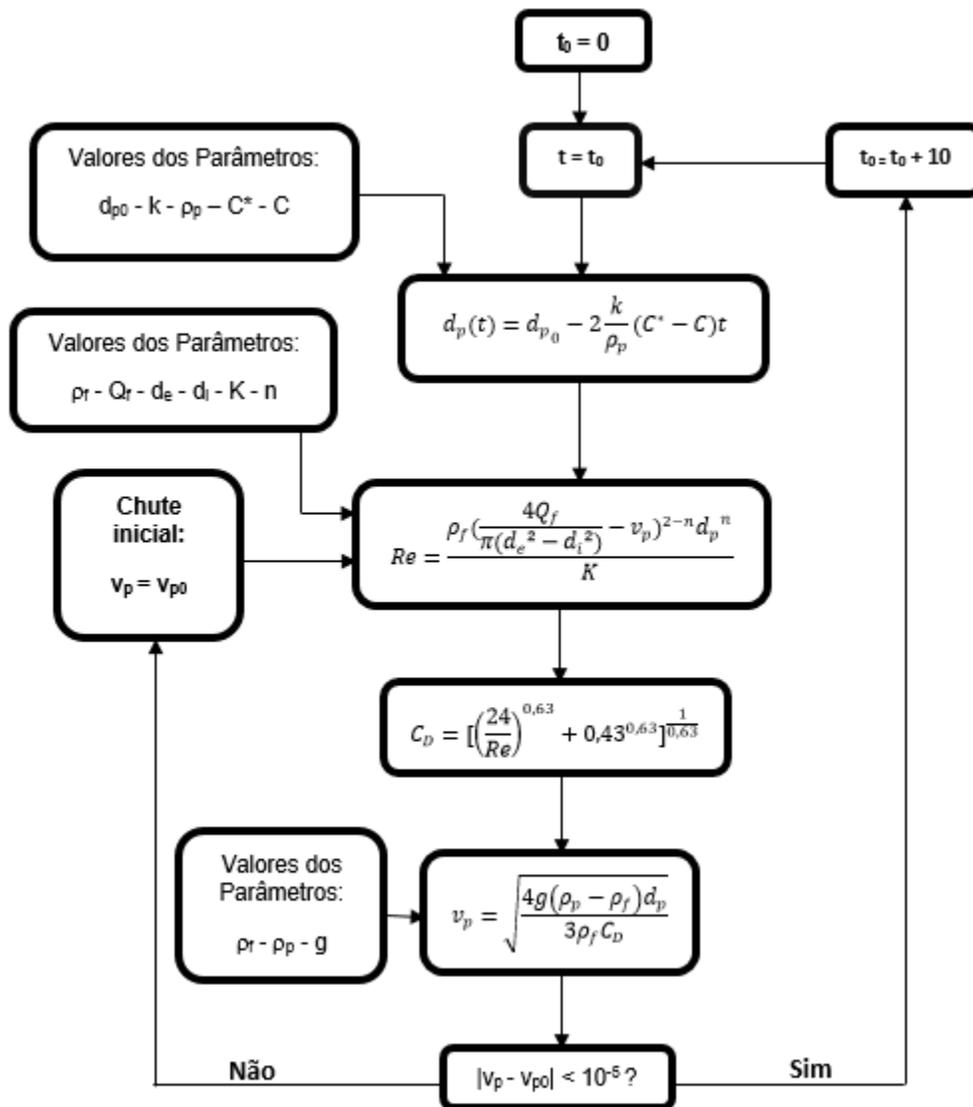
onde  $Q_f$  é a vazão de injeção de fluido.

Substituindo as equações (5.2) e (5.3) na (5.1), temos:

$$Re = \frac{\rho_f \left( \frac{4Q_f}{\pi(d_e^2 - d_i^2)} - v_p \right)^{2-n} d_p^n}{K} \quad (5.4)$$

Por último, podemos notar que ao substituirmos a equação (4.17), que é unicamente dependente da equação (5.4), nas equações (4.14) e (4.15), é preciso apenas resolver uma equação analítica iterativa no caso da equação (4.14) e uma equação numérica iterativa no caso da (4.15) para a solução dos problemas propostos.

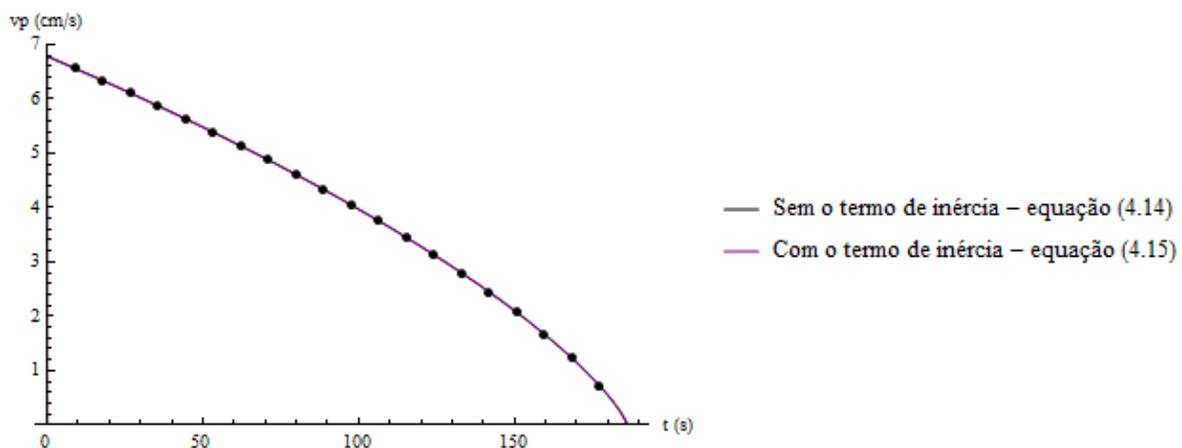
Com o auxílio do programa Mathematica, a equação (4.14) foi solucionada iterativamente, a partir do método da tentativa-e-erro. Entrando-se com o valor dos parâmetros: aceleração da gravidade, massas específicas do fluido e da partícula, índices de consistência e comportamento do fluido, vazão de injeção de fluido, diâmetro externo do tubo e diâmetro do poço e, com um chute inicial para a velocidade da partícula, ele retorna a solução da equação da velocidade de sedimentação sem considerar o termo de inércia. Com um total de cinco iterações com um passo de tempo de dez segundos o método convergiu de maneira bastante satisfatória, conforme ilustra a figura (5.2):



**Figura 5.2 – Fluxograma que ilustra a solução iterativa da equação da velocidade de sedimentação da partícula solúvel.**

Para a solução da equação (4.15), entra-se com esses mesmos parâmetros, só que dessa vez utilizando a função NDSolve, que resolve funções diferenciais e iterativas a partir de uma condição inicial ou de contorno. Foi utilizado o tempo em que a partícula se dissolve por completo onde a sua velocidade se torna zero como condição de contorno. Com isso, o programa retorna a solução da equação da velocidade da partícula considerando o termo de inércia.

Foi obtido como resultado um gráfico que compara as velocidades de sedimentação da partícula com e sem o termo de inércia, como mostra a figura (5.3).



**Figura 5.3 – Velocidade de sedimentação (cm/s) x Tempo (s).**

Pode-se observar que com o passar do tempo, o decaimento no diâmetro da partícula causa uma redução na sua velocidade de sedimentação. A partícula desacelera enquanto se dissolve no fluido, o que facilita seu transporte para a superfície, já que a velocidade de transporte aumenta com a diminuição de sua velocidade, aumentando também a razão de transporte dos cascalhos gerados na perfuração.

Além disso, ambas as soluções, equações (4.14) e (4.15), são semelhantes, como pudemos observar no gráfico (5.2). Portanto, fica claro que o termo de inércia pode ser desprezado, mesmo que a partícula não atinja uma velocidade constante, o que confirma a hipótese de PINTO (2012) que ao estudar o escoamento de bolhas de gás afirmou que a multiplicação da massa da partícula que possui um valor tão pequeno que, ao multiplicar a aceleração, gera um valor muito próximo de zero.

Definitivamente este é um resultado muito importante, já que a solução da equação (4.14) é analítica, enquanto que a (4.15) é numérica, ou seja, podemos trabalhar com uma solução bem mais simples de se resolver.

Uma observação importante a se fazer a partir dos resultados obtidos é que a diferença

entre as massas específicas é a força motriz para o atraso no transporte da partícula em relação ao fluido. Portanto um aumento nessa diferença gera uma maior velocidade da partícula.

As influências da vazão do fluido e de sua viscosidade, assim como os efeitos de população e de parede serão abordadas nas seguintes seções. As futuras simulações foram feitas para três diferentes fases do poço: as fases  $17^{1/2}$ " x 5" e  $12^{1/4}$ " x 5", que são típicas da perfuração da camada de sal, além da fase  $8^{1/2}$ " x 5" para efeitos de comparação por ser uma fase mais estreita.

### 5.3 Influência da vazão de injeção de fluido

Com o resultado da seção anterior sabemos que podemos trabalhar com qualquer uma das equações da velocidade de sedimentação (4.14) ou (4.15) para os futuros cálculos, já que elas são semelhantes.

O nosso próximo passo é medir, para diferentes fases do poço, como a velocidade de sedimentação da partícula varia em função da vazão de bombeio de fluido.

Para isso, foram gerados os seguintes gráficos, para três diferentes fases do poço. As vazões usuais para cada fase estão especificadas nas figuras. Os dados para os cálculos foram tirados da tabela (5.2), com a exceção dos valores da vazão ( $Q_f$ ) e do diâmetro do poço ( $d_e$ ) que variam para cada fase analisada.

a) Fase 17<sup>1/2</sup>" x 5"

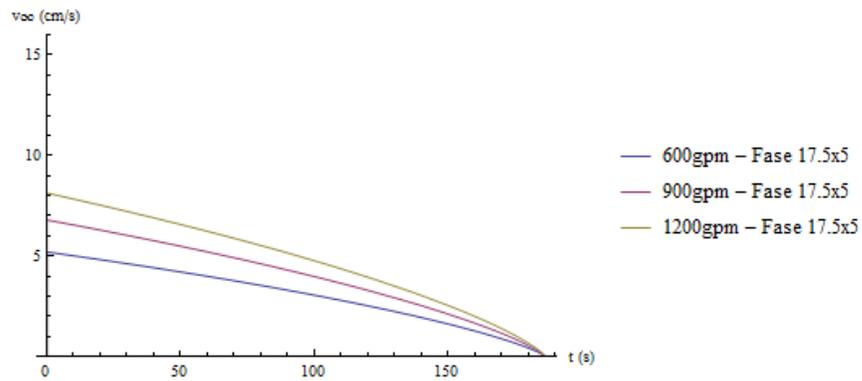


Figura 5.4 – Velocidade de sedimentação (cm/s) x Tempo (s) para a fase 17<sup>1/2</sup>" x 5", com vazões de bombeio variando entre 600 e 1200 galões por minuto.

b) Fase 12<sup>1/4</sup>" x 5"

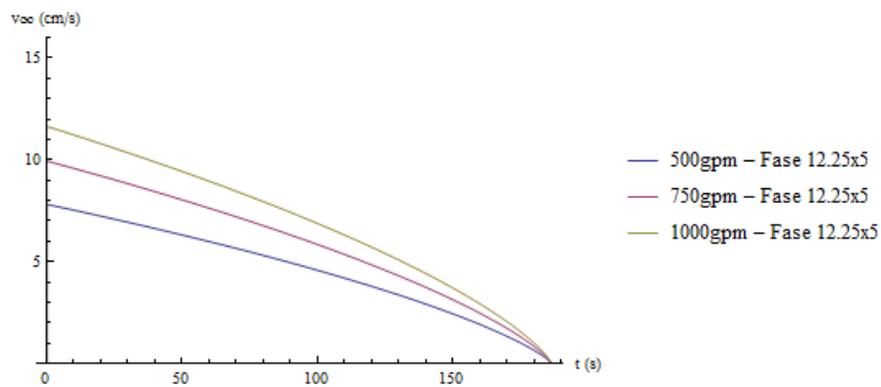


Figura 5.5 – Velocidade de sedimentação (cm/s) x Tempo (s) para a fase 12<sup>1/4</sup>" x 5", com vazões de bombeio variando entre 500 e 1000 galões por minuto.

c) Fase 8<sup>1/2</sup>" x 5"

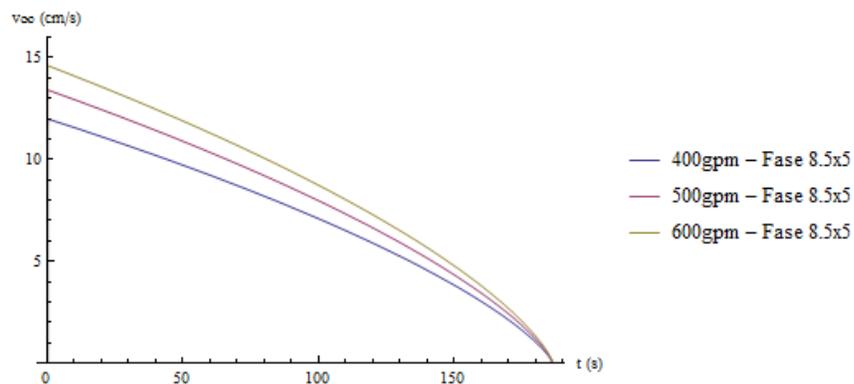


Figura 5.6 – Velocidade de sedimentação (cm/s) x Tempo (s) para a fase 8<sup>1/2</sup>" x 5", com vazões de bombeio variando entre 400 e 600 galões por minuto.

A partir destes resultados é possível notar que a velocidade de sedimentação da partícula aumenta à medida que o espaço anular se estreita, de acordo com a equação da continuidade, que por sua vez, afirma que para fluidos incompressíveis a velocidade e a área transversal ao fluxo variam de forma inversamente proporcional.

Para uma mesma fase, quando ocorre um aumento na vazão de injeção de fluido, a velocidade do fluido aumenta, de acordo com a equação da continuidade. Com isso o número de Reynolds também aumenta. Este, por sua vez, causa uma diminuição do coeficiente de arraste da partícula, fazendo com que ela tenha uma maior velocidade de sedimentação.

Além disso, para fluidos pseudoplásticos um aumento na velocidade do fluido causa uma diminuição em sua viscosidade, o que diminui a resistência ao fluxo da partícula, aumentando assim, a sua velocidade de sedimentação.

#### 5.4 Correção da velocidade de sedimentação para os efeitos de parede e concentração de partículas

Para a correção da velocidade da partícula para a influência da concentração de partículas foi necessária à medição da faixa de números de Reynolds desde o tempo inicial até o tempo da completa dissolução. Como todos os valores encontram-se na faixa entre um e quinhentos, utilizamos a fórmula a seguir para definir m:

$$m = 4,45Re_{\infty}^{-0,1} - 1 \quad (5.5)$$

Assim, a substituição da equação (4.14) na (4.33) fornece a velocidade de sedimentação ponderada para o efeito da concentração de partículas.

$$U = v_{\infty} * \varepsilon^m = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho_f)d_p}{3\rho_f C_D}} * \varepsilon^m \quad (5.6)$$

Após essa primeira correção para a velocidade de sedimentação foi simulada uma segunda correção, agora para a influência de fronteiras rígidas.

Para isso, a substituição da equação (4.34) na (5.6) fornece este resultado.

$$V_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho_f)d_p}{3\rho_f c_D}} * \varepsilon^m * k_p \quad (5.7)$$

onde  $V_s$  é a velocidade de sedimentação corrigida para ambos os efeitos.

Nesta mesma faixa de números de Reynolds, foi utilizada a equação (4.37) para a definição do fator  $k_p$ .

Com as equações (4.14) e (5.4) já resolvidas, que se referem à velocidade de sedimentação da partícula e ao número de Reynolds, respectivamente, foram utilizados os valores dos parâmetros da tabela (5.2) como entradas no programa Mathematica, com a exceção dos valores da vazão ( $Q_f$ ) e do diâmetro do poço ( $d_e$ ) que variam para cada uma das três fases analisadas. Para a correção do efeito de população, utilizou-se 0,99 como valor da fração volumétrica de fluido na suspensão ( $\varepsilon$ ).

Com isso, pôde-se chegar ao resultado do comportamento da velocidade da partícula corrigida para os efeitos de população e parede com o seu tempo de dissolução de forma direta.

Os seguintes gráficos mostram a influência de cada efeito em relação à velocidade não corrigida e a correção com ambos os efeitos.

a) Fase 17<sup>1/2</sup>" x 5"

Para uma vazão de injeção de 900 galões por minuto, foi obtido o seguinte gráfico:

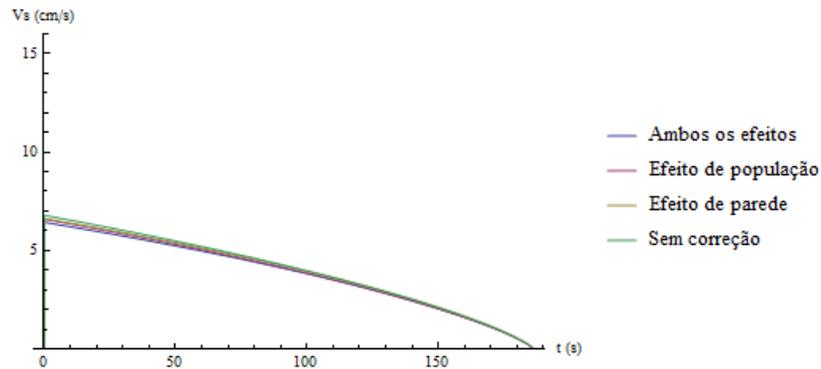


Figura 5.7 – Velocidade de sedimentação corrigida (cm/s) x Tempo (s) para a fase 17<sup>1/2</sup>" x 5".

b) Fase 12<sup>1/4</sup>" x 5"

Para uma vazão de injeção de 750 galões por minuto, foi obtido seguinte gráfico:

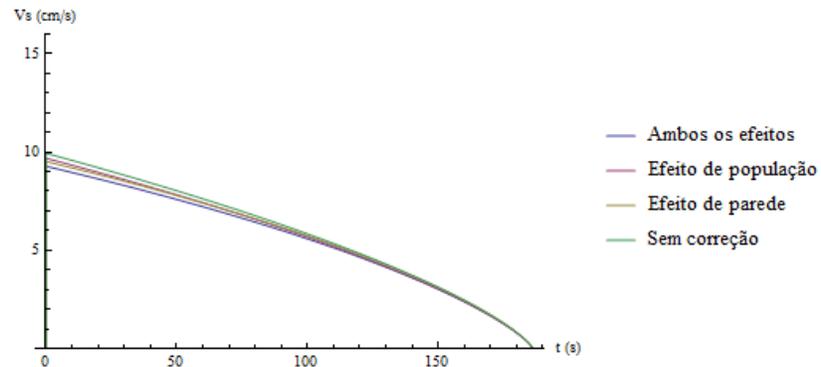


Figura 5.8 – Velocidade de sedimentação corrigida (cm/s) x Tempo (s) para a fase 12<sup>1/4</sup>" x 5".

c) Fase 8<sup>1/2</sup>" x 5"

Para uma vazão de injeção de 500 galões por minuto, foi obtido o seguinte gráfico:

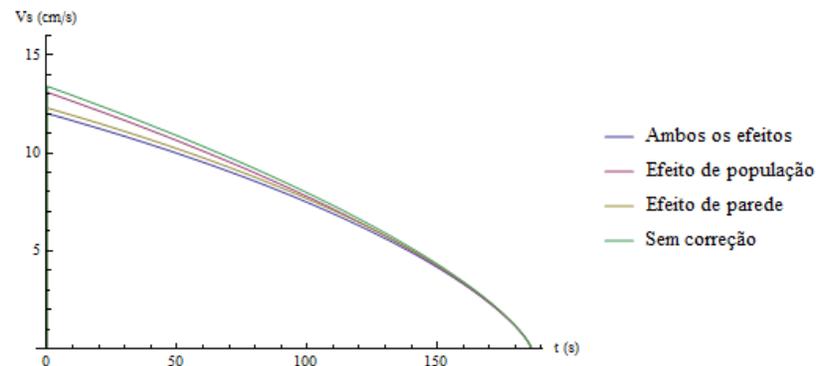


Figura 5.9 – Velocidade de sedimentação corrigida (cm/s) x Tempo (s) para a fase 8<sup>1/2</sup>" x 5".

No caso do efeito de população, podemos notar que, para os três casos, sua influência na velocidade de sedimentação da partícula é muito pequena, tendo em vista que a fração volumétrica da fase sólida na suspensão ( $c_v$ ), utilizada no presente estudo de caso, é muito baixa. Entretanto, é importante salientar que sua importância é muito significativa, já que seu efeito aumenta bastante quando essa fração é alta, ou seja, a adição de novas partículas retarda o movimento das mesmas em direção ao fundo do poço.

Quando partículas se movem em conjunto, elas causam um atrito entre elas, o que impõe uma perda adicional de energia cinética, que se observa na diminuição da velocidade de sedimentação.

De forma similar, nos casos em que o espaço anular é maior, o efeito de parede tem uma ordem de grandeza equivalente ao de população, porém, para a fase mais estreita do poço, o efeito das fronteiras rígidas é maior. Ou seja, quando o diâmetro hidráulico diminui considerando um mesmo diâmetro da partícula, a parede exerce uma força que retarda sua velocidade fazendo-a se afastar da parede.

## 5.5 Velocidade de transporte e razão de transporte

A partir das equações (2.1) e (2.2), que definem, respectivamente, a velocidade de transporte da partícula e a razão de transporte dos cascalhos salinos em direção à superfície, foram analisados os comportamentos destes dois parâmetros em função da dissolução do sal.

Com a substituição das equações (5.7) e (5.3) nas equações (2.1) e (2.2), foram obtidos os seguintes gráficos, para as mesmas fases analisadas anteriormente.

a) Fase 17<sup>1/2</sup>" x 5"

Os gráficos a seguir foram gerados considerando uma vazão de injeção de 900 galões por minuto, o que resulta em uma velocidade do fluido no anular no valor de 39,84 cm/s.

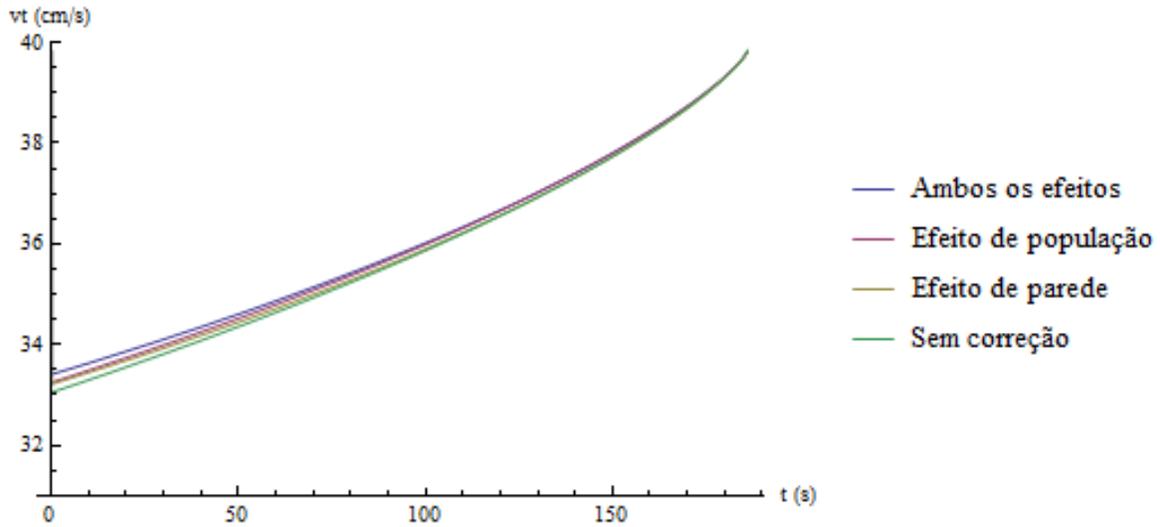


Figura 5.10 – Velocidade de transporte (cm/s) x Tempo (s) para a fase 17<sup>1/2</sup>" x 5".

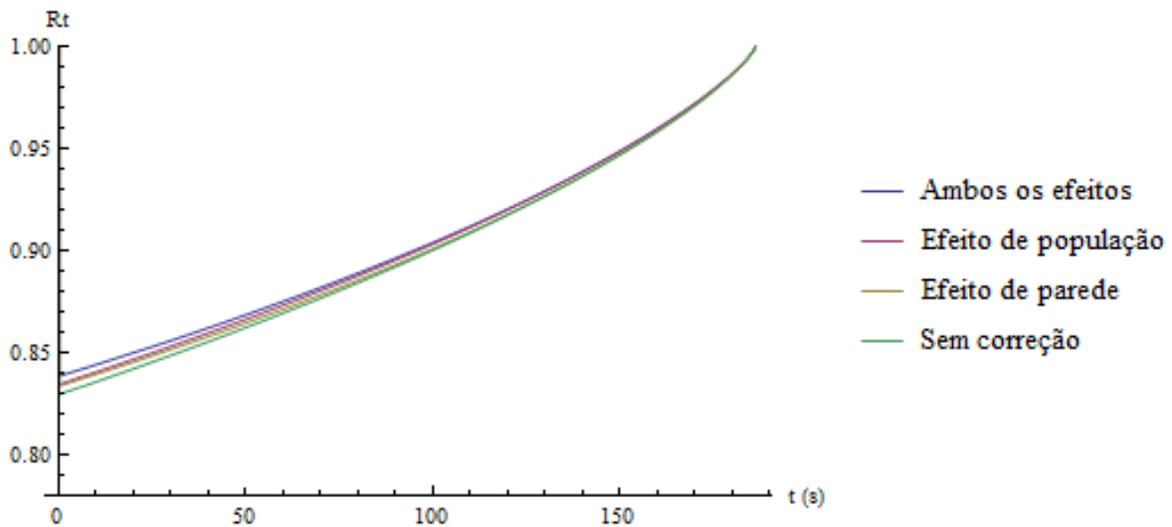


Figura 5.11 – Razão de transporte x Tempo (s) para a fase 17<sup>1/2</sup>" x 5".

b) Fase 12<sup>1/4</sup>" x 5"

Os gráficos a seguir foram gerados considerando uma vazão de injeção de 750 galões por minuto, o que resulta em uma velocidade do fluido no anular no valor de 74,66 cm/s.

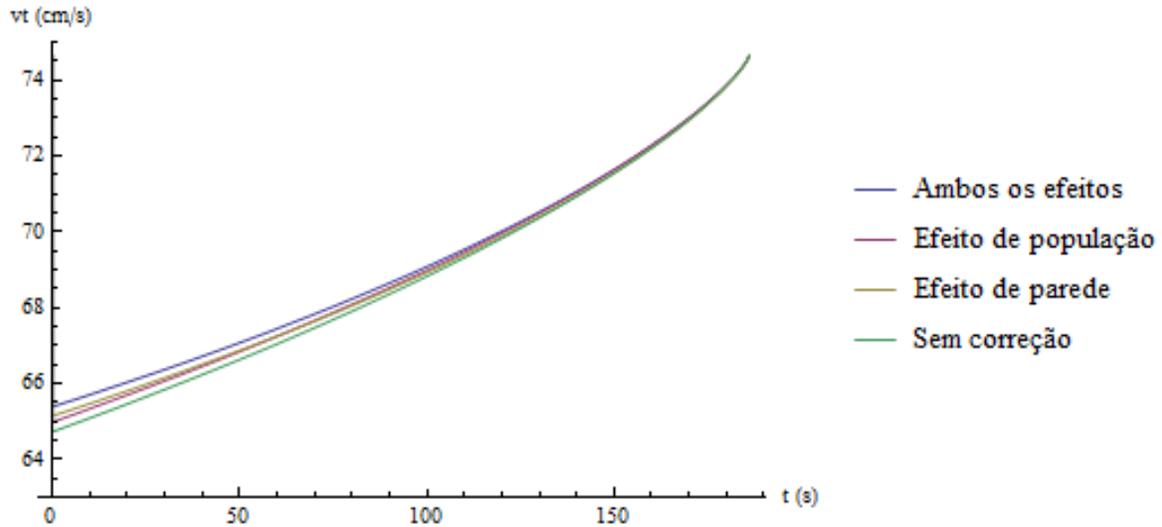


Figura 5.12 – Velocidade de transporte (cm/s) x Tempo (s) para a fase 12<sup>1/4</sup>" x 5".

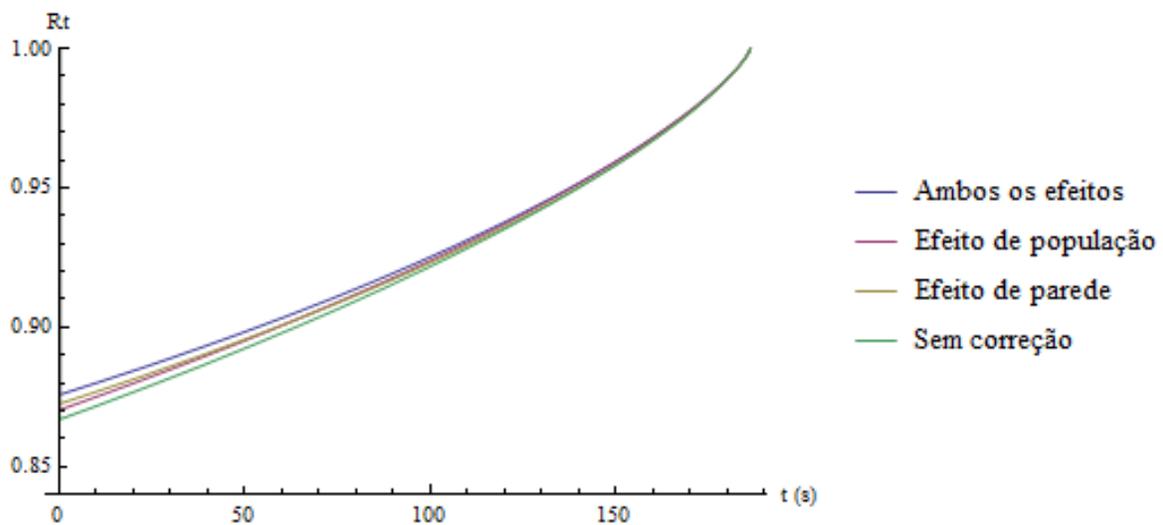


Figura 5.13 – Razão de transporte x Tempo (s) para a fase 12<sup>1/4</sup>" x 5".

c) Fase 8<sup>1/2</sup>" x 5"

Os gráficos a seguir foram gerados considerando uma vazão de injeção de 500 galões por minuto, o que resulta em uma velocidade do fluido no anular no valor de 131,74 cm/s.

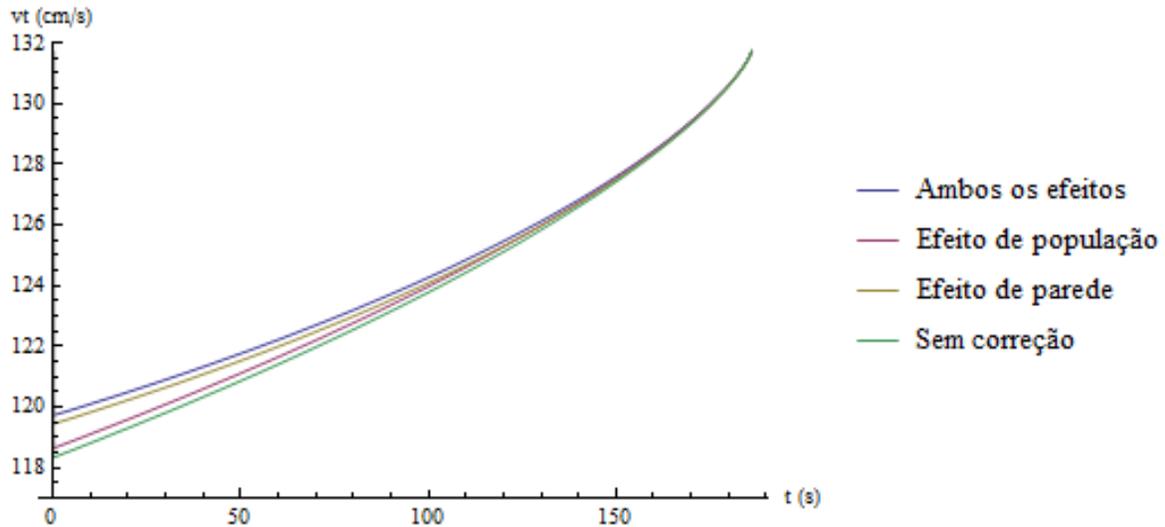


Figura 5.14 – Velocidade de transporte (cm/s) x Tempo (s) para a fase 8<sup>1/2</sup>" x 5".

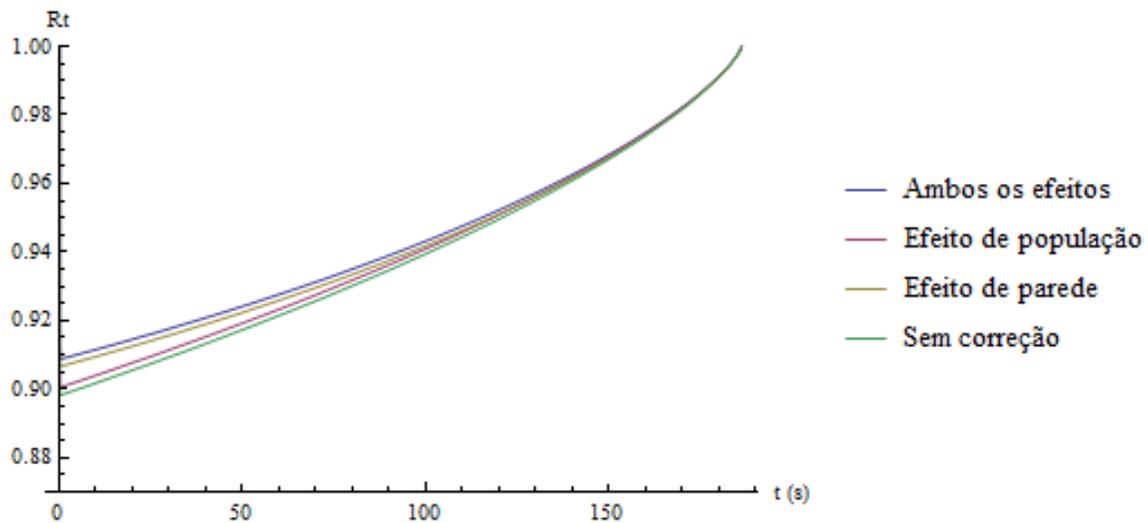


Figura 5.15 – Razão de transporte x Tempo (s) para a fase 8<sup>1/2</sup>" x 5".

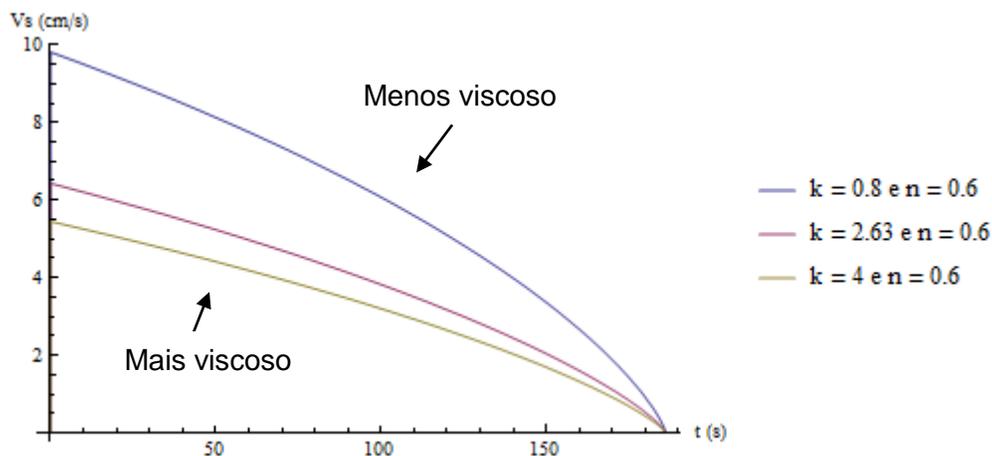
No nosso estudo de caso, a velocidade de sedimentação da partícula é muito baixa quando comparada à velocidade do fluido, o que explica as altas razões de transporte encontradas.

Além disso, tanto a velocidade de transporte, quanto a razão de transporte aumentam com a dissolução da partícula de sal, já que sua velocidade de sedimentação diminui com o tempo.

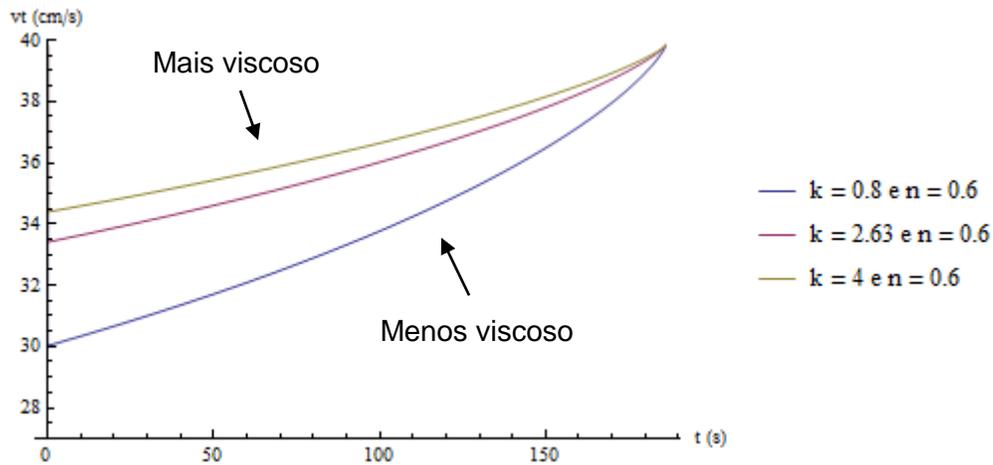
### 5.6 Influência da viscosidade do fluido

Até então todas as simulações foram feitas para um fluido de viscosidade média. Agora, iremos analisar o efeito da viscosidade do fluido na velocidade de sedimentação da partícula.

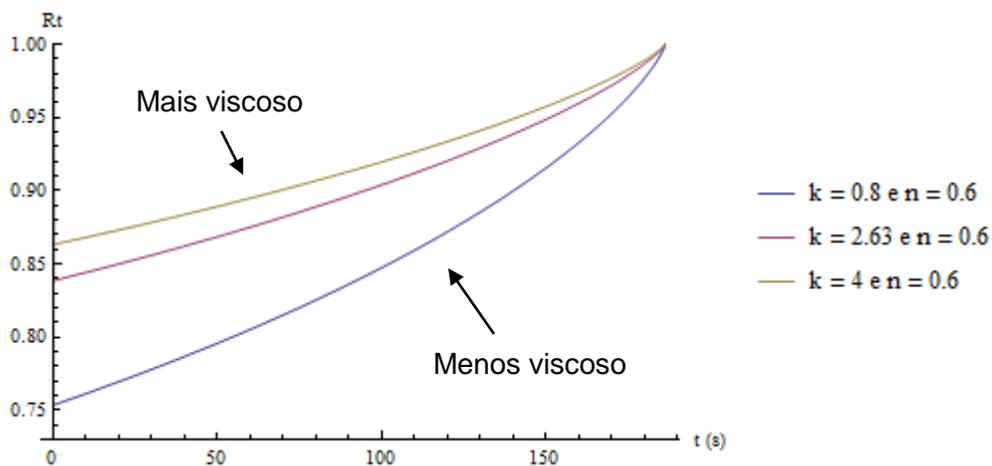
Para isso, escolhemos três valores diferentes para o índice de consistência do fluido ( $K$ ). Os outros parâmetros, com exceção do índice de consistência, tiveram seus valores retirados da tabela (5.2). Assim, foram obtidos os seguintes gráficos.



**Figura 5.16 – Velocidade de sedimentação (cm/s) x Tempo (s), variando-se a viscosidade do fluido.**



**Figura 5.17 – Velocidade de transporte (cm/s) x Tempo (s), variando-se a viscosidade do fluido.**



**Figura 5.18 – Razão de transporte x Tempo (s), variando-se a viscosidade do fluido.**

Podemos observar que a velocidade de sedimentação da partícula diminui à medida que a viscosidade do fluido aumenta. Logo, com a utilização de um fluido mais viscoso, teremos uma maior velocidade de transporte e, por conseguinte, uma maior quantidade de partículas será transportada em direção à superfície. Entretanto, é importante salientar que uma elevada viscosidade do fluido pode limitar a vazão de bombeio por gerar excessiva perda de carga durante sua circulação.

Isso pode ser explicado já que um aumento na viscosidade do fluido significa um aumento na resistência ao fluxo da partícula, gerando uma diminuição no número de Reynolds, que por sua vez, acarreta em um aumento do coeficiente de arraste. Com isso, a partícula se desloca mais lentamente em fluido mais viscoso.

## 6 RESULTADOS ECONÔMICOS DA SIMULAÇÃO

A partir dos resultados técnicos obtidos, pôde-se entender mais sobre os parâmetros que governam a velocidade da partícula imersa em um fluido de perfuração, como por exemplo: as influências da diferença das massas específicas, da vazão de injeção, da viscosidade do fluido e, dos efeitos de parede e população.

De acordo com tais influências, foi montado um estudo que visa obter o quanto poderá ser aumentada a taxa de penetração da broca durante a perfuração da camada de sal e, com isso, saber o quanto será economizado com uma perfuração mais rápida.

Foram feitas simulações utilizando os mesmos valores da tabela (5.2) para as massas específicas do fluido e da partícula e para o índice de comportamento do fluido para a fase 17<sup>1/2</sup>" x 5". Contudo, foi utilizado um fluido de viscosidade baixa, com valor para o índice de consistência de 0,8.

O método de solução para a velocidade de sedimentação da partícula já foi demonstrado anteriormente na seção 5.2. Então, substituindo a equação (5.7) e (5.3) na equação (2.2) e de acordo com os valores sugeridos chega-se à equação para a razão de transporte, ainda considerando três vazões de interesse para essa fase do poço.

Como critério para a limpeza do poço foi estabelecido um valor limite para a concentração volumétrica de sólidos no poço no valor de 5%. A equação (2.3) define este parâmetro. Ela é dependente da concentração volumétrica de sólidos na alimentação e da razão de transporte.

A razão de transporte já teve sua solução explicada. Entretanto, a concentração na alimentação (cv) ainda precisa ser definida. O que ocorre a seguir:

$$cv = \frac{ROP * A_{broca}}{ROP * A_{broca} + Q_f} \quad (6.1)$$

onde ROP é a taxa de penetração da broca e  $A_{broca}$  é a área transversal da broca, que é igual a área transversal do poço.

$$A_{broca} = \frac{\pi d_e^2}{4} \quad (6.2)$$

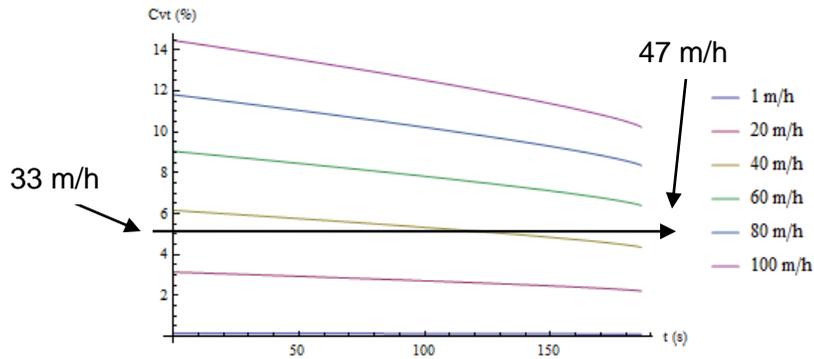
onde  $d_e$  é igual a 17,5 polegadas.

Como a porosidade das formações salinas normalmente é muito baixa, neste caso ela foi desprezada. Com isso, todo volume poroso perfurado foi considerado sendo composto unicamente por sólidos.

Como dito anteriormente, foram feitas simulações para três vazões de injeção de fluido. Sendo que para cada uma foram comparadas concentrações de sólidos para taxas de penetração variando de 1 a 100 metros por hora.

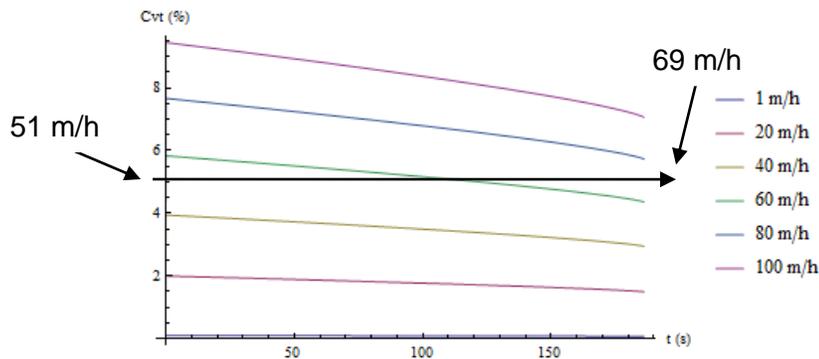
Tendo tudo isso em mente e, substituindo a equação da razão de transporte e a equação (6.1) na equação (2.3) pôde-se gerar os seguintes gráficos para a concentração de sólidos no poço.

Para uma vazão de injeção de 600 galões por minuto, foi obtido o seguinte gráfico:



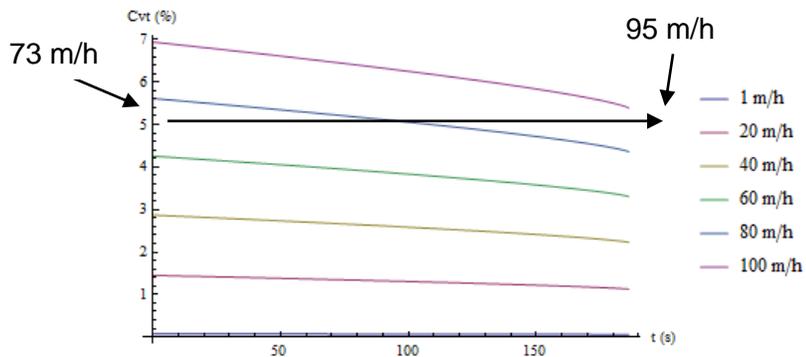
**Figura 6.1 – Concentração volumétrica de sólidos no poço (%) x Tempo (s), para uma vazão de 600 gpm.**

Para uma vazão de injeção de 900 galões por minuto, foi obtido o seguinte gráfico:



**Figura 6.2 – Concentração volumétrica de sólidos no poço (%) x Tempo (s), para uma vazão de 900 gpm.**

Para uma vazão de injeção de 1200 galões por minuto, foi obtido o seguinte gráfico:



**Figura 6.3 – Concentração volumétrica de sólidos no poço (%) x Tempo (s), para uma vazão de 1200 gpm.**

Como podemos ver, a dissolução do sal aumenta a razão de transporte das partículas solúveis, fazendo a concentração de sólidos no poço diminuir. Com uma limpeza do poço mais eficiente e com um critério de 5% de sólidos na solução é possível que a taxa de penetração da broca seja aumentada, como demonstrado nos três gráficos acima.

Para que se tenha um resultado concreto do benefício de se perfurar a camada salina com um fluido base água levemente subsaturado no fundo do poço, foi considerada uma camada de sal com 2000 metros de extensão e um aluguel de sonda offshore no valor de 1 milhão de dólares por dia.

No primeiro caso, em que o fluido de perfuração é bombeado à 600 galões por minuto, pôde-se passar de uma taxa de penetração de 33 metros por hora para uma de 47 metros por hora, como ilustrado na figura (6.1). Em outras palavras, o tempo efetivo de perfuração da camada salina passou de 2 dias e meio para 1 dia e 18 horas por poço. Considerando uma campanha exploratória de 10 poços e o preço do aluguel da embarcação supracitado, a economia chega a 7 milhões e meio de dólares.

Nos casos seguintes, em que o fluido é bombeado com vazões mais elevadas, observamos também um aumento significativo na taxa de penetração dos poços, como ilustrado nas figuras (6.2) e (6.3). Entretanto, as taxas encontradas estão muito acima da média das taxas reais de avanço da broca.

Pôde-se observar que quanto mais alto for a vazão de bombeio de fluido maior será a taxa de penetração da broca. Contudo, outros parâmetros devem ser analisados quando se quer escolher a vazão ideal de fluido para se perfurar uma certa fase em uma dada formação. Um aumento na vazão de fluido gera uma maior perda de carga no espaço anular, o que aumenta a densidade de circulação equivalente (ECD), podendo causar kicks e perdas de circulação em poços que tenham uma janela operacional estreita entre

o gradiente de pressão de poros e o gradiente de fratura. Como a formação analisada é salina, onde a porosidade é muito baixa, uma vazão elevada pode causar um alargamento excessivo da formação durante a circulação seguido de uma retração quando ocorre uma parada no bombeio.

Para evitar um cisalhamento ou alargamento excessivo da parede do poço, é importante trabalharmos com uma vazão de bombeio mínima de fluido que seja capaz de vencer a pressão hidrostática e a perda de carga durante sua circulação.

## 7 CONCLUSÕES

Foi realizado um estudo visando avaliar o efeito causado pelo decaimento do diâmetro da partícula salina na cinemática de transporte de uma partícula solúvel. Os resultados mostram que, conforme o esperado, a velocidade de sedimentação está em constante diminuição enquanto a partícula dissolve. Pode-se notar que a velocidade terminal da partícula não é atingida, é possível apenas determinar a velocidade máxima que ela pode atingir para um determinado instante de tempo analisado. Além disso, foram analisados os efeitos de parede, da concentração de partículas, do termo de inércia, da viscosidade e da vazão de fluido, o que possibilitou uma melhor compreensão de como esses fatores influenciam na dinâmica do transporte dos cascalhos.

Com isso, podemos concluir que a utilização de fluidos base água levemente subsaturados contribuem para uma melhor limpeza do poço durante a perfuração da camada de sal. A dissolução dos cascalhos faz com que as suas velocidade e razão de transporte em direção à superfície aumentem, gerando uma menor concentração de sólidos no poço. Isso possibilita um aumento nas taxas de penetração da broca, o que impacta diretamente no tempo de perfuração da fase e, conseqüentemente, na economicidade do empreendimento.

## 8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar os seguintes efeitos na velocidade de transporte da partícula solúvel:

- Aumento da concentração de sal no fluido como decorrência da dissolução;
- Forma da partícula;
- Perfil de temperatura no poço;
- Diferentes tipos de sais;
- Alargamento do poço;
- Recristalização dos sais.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKSEL'RUD, G.A., BOIKO, A.E. e KASHCHEEV, A. E., **Kinetics of the Solution of Mineral Salts Suspended in a Liquid Flow**. UDC 532.73-3. SPE (Society of Petroleum Engineers), 1992.

ALMEIDA, O. P., **Estudo do Efeito de Fronteiras Rígidas sobre a Velocidade Terminal de Partículas Isoméricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Engenharia Química. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.

AZAR, J. J. e SANCHEZ, R. A., **Important Issues in Cuttings Transport for Drilling Directional Wells**. Paper SPE 39020 apresentado no 5th Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, 30 Ago. - 3 Set. 1997.

BELAVADI, M. N. e CHUKWU, G. A., **Experimental Study of the Parameters Affecting Cuttings Transport in a Vertical Wellbore Annulus**. Paper SPE 27880 apresentado em Western Regional Meeting, Long Beach, 23-25 Mar. 1994.

BLACKERY, J., MITSOULIS, E., **Creeping Motion of a Sphere in Tubes Filled with a Bingham Plastic Material**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 70:59-77, 1997.

BOURGOYNE, A. T., et al., **Applied Drilling Engineering**. SPE Text Book Series, v. 2. 2005.

CANDELA, W. F. L., **Modelo Matemático Simplificado para Migração de Bolhas de Gás em Fluido Viscoplastico**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

CHHABRA, R. P., RICHARDSON, J. F., **Non-Newtonian Flow in the Process Industries**. Butterworth-Heinemann, 1999.

CLARK, R. K. e BICKHAM, K. L., **A Mechanistic Model for Cuttings Transport**. Paper SPE 28306 apresentado no 69th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 25-28 Set. 1994.

COELHO, R. M. L. E MASSARANI, G., **Fluidodinâmica de Partículas: Ainda sobre Correlações em Base aos Dados Experimentais de Pettyjohn e Christiansen**. Relatório LSP/COPPE 1/96. 1996.

FRANCIS, A. W., **Wall effect in falling ball method for viscosity**. Physics, vol. 4, 403-406. 1933.

GUILD, G. J., et al., **Hole Cleaning Program for Extended Reach Wells**. Paper SPE/IADC 29381 apresentado em 1995 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 28 Fev. – 2 Mar. 1995.

HEMPHILL, T. e LARSEN, T. I., **Hole-Cleaning Capabilities of Water- and Oil- Based Drilling Fluids: A Comparative Experimental Study**. Paper SPE 26328 apresentado em 1993 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 3-6 Out. 1993.

HUSSAINI, S. M. e AZAR J. J., **Experimental Study of Drilled Cuttings Transport Using Common Drilling Muds**. SPEJ, pp. 11-20, Fev. 1983.

LAPPLE, C. E. e SHEPHERD, C. B., **Calculation of particle trajectories**. IEC, vol. 32, nº 5, 605-617. 1940.

LARUCCIA, M B., **Velocidade de Sedimentação em Fluidos não-Newtonianos: Efeito da Forma e da Concentração de Partículas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, p.143. 1990.

LI, Y. e KURU, E., **Numerical Modeling of Cuttings Transport with Foam in Vertical Wells**. Paper 2003-066 apresentado em Petroleum Society's Canadian International Petroleum Conference 2003, Calgary, 10-12 Jun. 2003.

LUO, Y., et al., **Simple Charts to Determine Hole Cleaning Requirements in Deviated Wells**. Paper IADC/SPE 27486 apresentado em 1994 SPE/IADC Drilling Conference, Dallas, 15-16 Fev. 1994.

MARTINS, Y., et al., **Experimental Determination of Interfacial Friction Factor in Horizontal Drilling with a Bed of Cuttings**. Paper SPE 36075 apresentado no 4th SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Port of Spain, 23-26 Abr. 1996.

MARTINS, L. A. A., Calçada, L. A., Scheid, C. M., **Theoretical and Experimental Study of Dissolution of Salt Particles in Brine Flow**. Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás, 2C-SPC, Teresópolis, Rio de Janeiro, Brasil, 5-8 Agosto 2013.

MASSARANI, G., **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

MUNROE (1888), citado por FIDLERIS, V. e WHITMORE, R. L., **Experimental determination of the wall effect for spheres falling axially in cylindrical vessels**. British J. of Applied Physics, vol. 12, 490-494. 1961.

- PETTYJOHN, E. S. e CHRISTIANSEN, E. B., **Effect of particle shape on free-settling rates of isometric particles**. Chem. Eng. Progress, vol. 44, nº 2, 157-172. 1948.
- PHILIP, Z., SHARMA, M. M. & CHENEVERT, M. E., **The Role of Taylor Vortices in the Transport of Drill Cuttings**. Paper SPE 39504 apresentado em SPE India Oil and Gas Conference and Exhibition, New Delhi, 7-9 Abr. 1998.
- PILEHVARI, A. A., AZAR, J. J. & SHIRAZI, S. A., **State-of-the-Art Cuttings Transport in Horizontal Wellbores**. SPE Drill and Completion 14 (3), pp. 196-200, Set. 1990.
- PINTO, G. H. V. P., **Cinemática de Partículas em Fluidos de Viscosidade Variável com o Tempo e sua Aplicação na Construção de Poços de Petróleo: Avaliação durante Paradas Operacionais**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. UFRN, Natal, 2008.
- PINTO, G. H. V. P., **Metodologia para Avaliação de Cinemática de Partículas Gasosas em Fluidos de Viscosidade Variável com o Tempo e sua Aplicação na Construção de Poços de Petróleo**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2012.
- RICHARDSON, J. F. & ZAKI, W. N., **Sedimentation and Fluidization: Tran. Inst. Chem. Eng.**, n.1, vol. 32, p. 35. 1954.
- SÁ, C. H. M., **Avaliação Experimental dos Efeitos de Parede, da Concentração de Partículas e da Reologia em um Escoamento Axial Anular Sólido-Fluido Não-Newtoniano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1990.
- TABUTEAU, H., COUSSOT, P., DE BRUYN, J. R., **Drag Force on a Sphere in Steady Motion through a Yieldstress Fluid**. Journal of Rheology, 51(1):125-137, 2007.
- THOMAS, J. E., et al., **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Editora Interciência, 2001.
- YU, M., et al., **A New Approach to Improve Cuttings Transport in Horizontal and Inclined Wells**. Paper SPE 90529 apresentado em 2004 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 26-29 Set. 2004.