



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA – CCET

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE

PETRÓLEO - PPGCEP



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Cinemática de Partículas em Fluidos de Viscosidade Variável com o Tempo e sua  
Aplicação na Construção de Poços de Petróleo: Avaliação durante Paradas  
Operacionais.**

Gustavo Henrique Vieira Pereira Pinto

**Orientador:** Prof. Dr. Wilson da Mata.

**Co-orientador:** Dr. André Leibsohn  
Martins (PETROBRAS-CENPES)

**Natal / RN, Novembro de 2008**

**Cinemática de Partículas em Fluidos de Viscosidade Variável com o Tempo e sua  
Aplicação na Construção de Poços de Petróleo: Avaliação durante Paradas  
Operacionais.**

Gustavo Henrique Vieira Pereira Pinto

**Natal / RN, Novembro de 2008**

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Pinto, Gustavo Henrique Vieira Pereira.

Cinemática de partículas em fluidos de viscosidade variável com o tempo e sua aplicação na construção de poços de petróleo: avaliação durante paradas operacionais / Gustavo Henrique Vieira Pereira Pinto. – Natal, RN, 2008.

111 f. : il.

Orientador: Wilson da Mata.

Co-orientador: André Leibsohn.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia - CT. Centro de Ciências Exatas e da Terra – CCET. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo - PPGCEP.

1. Reologia – Dissertação. 2. Sedimentação de partículas - Dissertação. 3. Conexões e manobras de tubos – Dissertação. I. Mata, Wilson da. II. Leibsohn, André.

RN/UF/BCZM

CDU 624.131.54(043.3)

**Gustavo Henrique Vieira Pereira Pinto**

**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 de Mestrado  
apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Ciência e Engenharia  
de Petróleo PPGCEP, da  
Universidade Federal do Rio Grande  
do Norte, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Mestre  
em Ciência e Engenharia de  
Petróleo.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2008.

---

Prof. Dr. Wilson da Mata.

Orientador – UFRN

---

Dr. André Leibsohn Martins

Co-orientador - (PETROBRAS-CENPES)

---

Prof. Dr. Adriano dos Santos

Membro Interno - UFRN

---

Prof. Dr. João Bosco de Araújo Paulo

Membro Externo - UFRN

**PINTO**, Gustavo Henrique Vieira Pereira - 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 de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Área de Concentração: Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo. Linha de Pesquisa: Engenharia e Geologia de Reservatórios e de Exploração de Petróleo e Gás Natural, Natal – RN, Brasil.

**Orientador:** Prof. Dr. Wilson da Mata

**Co-orientador:** Dr. André Leibsohn Martins

## RESUMO

---

As novas descobertas de reservatórios de petróleo em campos *onshore* e *offshore* em lâminas d'águas ultra-profundas e de trajetórias complexas demandam a otimização dos processos de perfuração para reduzir as operações de paradas durante a perfuração de um poço, especialmente devido ao elevado custo das plataformas, equipamentos e dos riscos que são inerentes à operação. Dentre os aspectos mais importantes destaca-se o projeto de fluidos de perfuração e o estudo de seu comportamento frente a diferentes situações que podem ocorrer durante o processo. Através de experimentos de sedimentação, foi validada uma correlação para determinação da velocidade de sedimentação de partículas em fluidos de viscosidade variável com o tempo, aplicando-se as devidas correções para viscosidade efetiva que é função da taxa de deformação e do tempo. A evolução da viscosidade com o tempo foi obtida através de ensaios reológicos utilizando uma taxa de deformação fixa, pequena o suficiente para não interferir no processo de gelificação do fluido. Com as equações de velocidade de sedimentação de partículas e da viscosidade do fluido com o tempo foi proposto um procedimento iterativo capaz de determinar o deslocamento das partículas com o tempo. Essas equações constitutivas foram aplicadas no estudo de caso para simulação da sedimentação dos cascalhos gerados na perfuração de um poço de petróleo durante paradas operacionais, especialmente as conexões e manobras, possibilitando o projeto do fluido de perfuração de maneira a manter os cascalhos em suspensão, evitando riscos, como por exemplo, a prisão da coluna de perfuração e em condições mais drásticas, a perda do poço.

---

**Palavras-Chaves:** Reologia, sedimentação de partículas, conexões e manobras de tubos.

## ABSTRACT

---

The new oil reservoirs discoveries in onshore and ultra deep water offshore fields and complex trajectories require the optimization of procedures to reduce the stops operation during the well drilling, especially because the platforms and equipment high cost, and risks which are inherent to the operation. Among the most important aspects stands out the drilling fluids project and their behavior against different situations that may occur during the process. By means of sedimentation experiments, a correlation has been validated to determine the sedimentation particles velocity in variable viscosity fluids over time, applying the correction due to effective viscosity that is a shear rate and time function. The viscosity evolution over time was obtained by carrying out rheologic tests using a fixed shear rate, small enough to not interfere in the fluid gelling process. With the sedimentation particles velocity and the fluid viscosity over time equations an iterative procedure was proposed to determine the particles displacement over time. These equations were implemented in a case study to simulate the cuttings sedimentation generated in the oil well drilling during stops operation, especially in the connections and tripping, allowing the drilling fluid project in order to maintain the cuttings in suspension, avoiding risks, such as stuck pipe and in more drastic conditions, the loss of the well.

---

**Keywords:** Rheology, particle sedimentation, pipes connections and tripping.

*“Observa o que fazeis do tempo e vale-te dele  
para instalar bondade e compreensão,  
discernimento e equilíbrio em ti mesmo, porque  
o dia que deixas passar vazio e inútil é,  
realmente, um tesouro perdido que não mais  
voltará ...”*

*Emmanuel “Chico Xavier”*

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela dádiva suprema da vida, por tudo que fui, sou e serei, permitindo-me vencer mais este desafio.

À minha esposa, Priscilla Oliveira Alves Pereira Pinto, por todo apoio, amor, compreensão e pela companhia ao longo da trajetória que me levou à concretização deste sonho.

Aos meus pais, José Ney Pereira Pinto e Zélia Maria Vieira Pereira Pinto, que forneceram grande apoio fraternal, contribuindo para formação do alicerce de minha vida. Aos meus irmãos Humberto Henrique e Ricardo Henrique pelo apoio e incentivo nessa jornada.

Ao Professor orientador Dr. Wilson da Mata, pelos ensinamentos repassados durante as aulas, cujos temas foram de fundamental importância para o entendimento dos diversos processos da indústria de petróleo e pelas sugestões para complementação deste trabalho.

Ao co-orientador e grande amigo André Leibsohn Martins, Consultor Sênior do Centro de Pesquisa da Petrobras – CENPES, em especial, com reflexões criativas me forneceu orientações sobre os assuntos que merecem maior atenção no contexto atual da Indústria do Petróleo, cujos estudos mais aprofundados são de interesse da Petrobras, e pelo acompanhamento de todas as etapas deste trabalho, o meu muito obrigado.

Aos professores componentes da banca, Dr. João Bosco de Araújo Paulo e Dr. Adriano dos Santos pelas relevantes sugestões para complementação deste trabalho.

Ao grupo que compõe o Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica – PUC/RJ, Flávio, Renata, Priscila e André, e ao grupo que compõe o CENPES/PDP/TEP, Pedro, Roni, Maurício, Alex, Raul, Hellen, Idivard e demais colegas pela colaboração durante as atividades.

Aos colegas da turma 2006.2, os quais demonstraram companheirismo durante as atividades desenvolvidas durante o curso.

À secretária do curso Viviane Medeiros de Freitas, cuja compreensão foi determinante, pois mesmo eu estando distante, agilizou todos os assuntos burocráticos exigidos durante o curso.

A todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para esta formação que se torna mais uma vitória em minha vida, os meus sinceros agradecimentos.



## SUMÁRIO

1. Introdução geral	
1.1 Utilização de fluidos para perfuração de poços .....	19
1.2 Transporte de cascalhos durante bombeio e em condições estáticas .....	20
1.3 Objetivo do trabalho.....	21
1.3.1 Objetivo Geral.....	21
1.3.2 Objetivos Específicos .....	21
2. Aspectos teóricos	
2.1 Transporte de sólidos.....	23
2.1.1 Velocidade relativa de partículas em meios contínuos .....	23
2.1.2 Razão de transporte .....	30
2.1.3 Influência da taxa de deformação e do tempo na viscosidade .....	31
2.1.4 Taxa de deformação característica do processo de sedimentação .....	31
3. Estado da arte	
3.1 Influência da forma da partícula .....	34
3.2 Influência de fronteiras rígidas .....	35
3.3 Influência da concentração de partículas.....	38
3.4 Taxa de deformação característica do processo de sedimentação .....	41
3.5 Correlações de velocidade .....	42
3.5.1 Correlação de Moore .....	42
3.5.2 Correlação de Chien .....	43
3.6 Classificação dos fluidos de perfuração .....	44
3.6.1 Fluidos à base água.....	44
3.6.2 Fluidos à base óleo .....	46
3.6.3 Fluidos à base ar.....	47
3.7 Reologia.....	47
3.7.1 Comportamento reológico .....	48
3.7.1.1 Fluidos Newtonianos .....	50
3.7.1.2 Fluidos não-Newtonianos .....	50
3.7.1.2.1 Fluidos pseudoplásticos .....	51
3.7.1.2.2 Fluidos dilatantes.....	51
3.7.1.2.3 Fluidos plásticos ou de Bingham.....	52
3.7.2 Modelos Reológicos .....	52
3.7.2.1 Modelo de Ostwald de Waale (Lei da Potência).....	53
3.7.3 Viscosimetria .....	54
3.7.4 Reometria.....	55
3.7.4.1 Reômetro rotacional de cilindros concêntricos .....	56
3.7.4.2 Reômetro rotacional de placas paralelas.....	56
3.7.4.3 Reômetro rotacional de cone e placa.....	57
3.8 Influência da Temperatura no comportamento reológico de fluidos. ....	58
3.9 Coeficiente de atrito ou resistência .....	58
4. Procedimento experimental	
4.1 Materiais e métodos .....	63
4.1.1 Fluidos utilizados .....	63
4.1.2 Ensaio reológico FANN 35 A.....	63
4.1.3 Ensaio reológico no reômetro ARES .....	65
4.1.4 Ensaio de sedimentação .....	67
4.1.5 Procedimento iterativo.....	69
5. Resultados e discussão	

5.1 Sedimentação de esferas.....	72
5.2 Determinação do modelo reológico para os fluidos utilizados.....	75
5.3 Determinação da função viscosidade com o tempo .....	78
6. Estudo de caso	
6.1 Sedimentação durante conexões e manobras.....	82
6.2 Procedimento de cálculo.....	83
6.3 Análise de sensibilidade .....	86
6.3.1 Análise referente ao parâmetro multiplicativo do tempo presente na equação da viscosidade em função do tempo (a).....	87
6.3.2 Análise referente ao expoente do tempo presente na equação da viscosidade em função do tempo (b) .....	89
6.3.3 Análise de sensibilidade para avaliar o deslocamento das partículas e o grau de gelificação do fluido B. ....	92
6.3.3.1 Análise de sensibilidade para avaliar a viscosidade do fluido, velocidade e deslocamento das partículas utilizando os dados experimentais. ....	93
6.3.3.2 Análise de sensibilidade para avaliar o grau de gelificação do fluido em função dos parâmetros (a) e (b). ....	95
6.3.3.3 Análise de sensibilidade para avaliar o grau de gelificação do fluido em função da viscosidade inicial do fluido ( $\eta_0$ ). ....	98
6.3.3.4 Análise de sensibilidade para avaliar o deslocamento das partículas em função dos parâmetros (a) e (b).....	99
6.3.4 Análise de sensibilidade utilizando água como fluido. ....	100
7. CONCLUSÕES .....	104
8. RECOMENDAÇÕES .....	106
REFERÊNCIAS .....	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de corpo livre da esfera.....	23
Figura 2 - Transporte de sólidos em trechos inclinados e horizontais.....	29
Figura 3 - Classificação do comportamento reológico .....	49
Figura 4 - Curvas de escoamento. Pseudoplástico, Bingham, Dilatante e Newtoniano. ....	52
Figura 5 - Curvas de escoamento como função do índice de comportamento – n. ....	53
Figura 6 - Geometria de cilindros concêntricos .....	56
Figura 7 - Geometria de placas paralelas. ....	57
Figura 8 - Geometria de cone e placa. ....	57
Figura 9 - Viscosímetro Fann, modelo 35 A.....	63
Figura 10 - Reômetro - modelo ARES .....	65
Figura 11 - Banho termostático - NESLAB RTE 17 .....	66
Figura 12 - Geometria <i>Grooved Couette</i> .....	66
Figura 13- Esferas utilizadas .....	68
Figura 14 - Centralizador para lançamento de esferas.....	68
Figura 15 - Fluxograma para determinação do deslocamento das partículas dentro do poço.....	70
Figura 16 - Resultado comparativo entre as velocidades experimentais e as velocidades teóricas para o fluido B com relação ao diâmetro das esferas.....	73
Figura 17 - Resultado comparativo entre as velocidades experimentais e as velocidades teóricas para o fluido C com relação ao diâmetro das esferas.....	74
Figura 18 - Dados de entrada para o SIMCARR.....	75
Figura 19 - Resultados gerados pelo SIMCARR.....	76
Figura 20-Comportamento da tensão em função da taxa de cisalhamento para o fluido A.....	76
Figura 21 - Comportamento da tensão em função da taxa de cisalhamento para o fluido B.....	77
Figura 22 - Comportamento da tensão em função da taxa de cisalhamento para o fluido C.....	78
Figura 23 - Comportamento da viscosidade com o tempo para o Fluido A. ....	79
Figura 24 - Comportamento da viscosidade com o tempo para o Fluido B.....	79
Figura 25 - Comportamento da viscosidade com o tempo para o Fluido C.....	80
Figura 26 - Fluxograma para determinação do deslocamento das partículas dentro do poço.....	86
Figura 27 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( <i>a</i> ) para a viscosidade do fluido. ....	87
Figura 28 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( <i>a</i> ) para a velocidade das partículas. ....	88
Figura 29 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( <i>a</i> ) para o deslocamento das partículas. ....	89
Figura 30 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( <i>b</i> ) para a viscosidade do fluido. ....	90
Figura 31 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( <i>b</i> ) para a velocidade das partículas. ....	91
Figura 32 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( <i>b</i> ) para o deslocamento das partículas. ....	91
Figura 33 - Avaliação da viscosidade do fluido B com o tempo utilizando as eq. 3.37 e 6.1. ....	93

Figura 34 - Viscosidade em função do tempo para o fluido B com (a) e (b) obtidos experimentalmente.....	93
Figura 35 - Velocidade em função do tempo para o fluido B com (a) e (b) obtidos experimentalmente.....	94
Figura 36 – Deslocamento das partículas em função do tempo para o fluido B com (a) e (b) obtidos experimentalmente. ....	94
Figura 37 - Grau de gelificação em função do parâmetro (a) para (b) = 0,2. ....	95
Figura 38 - Grau de gelificação em função do parâmetro (a) para (b) = 0,4. ....	96
Figura 39 - Grau de gelificação em função do parâmetro (b) para (a) =2,0. ....	97
Figura 40 - Grau de gelificação em função do parâmetro (b) para (a) = 6,0.....	97
Figura 41 - Grau de gelificação em função de ( $\eta_0$ ).....	98
Figura 42 - Deslocamento das partículas em função do parâmetro (a), para (b) = 0,2; 0,3 e 0,4.....	99
Figura 43 - Deslocamento das partículas em função do parâmetro (b), para (a) = 2; 4 e 6. ....	100
Figura 44 - Comportamento da viscosidade da água como função do tempo.....	100
Figura 45 - Comportamento da velocidade das partículas como função do tempo para água. ....	101
Figura 46 - Comportamento do deslocamento das partículas como função do tempo utilizando água.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Correlações para determinação do coeficiente de resistência das partículas para fluidos Newtonianos.....	60
Tabela 2 - Correlações para determinação do coeficiente de resistência das partículas para fluidos não-Newtonianos (Modelo de Potência).....	61
Tabela 3 - Dados das esferas utilizadas .....	67
Tabela 4- Parâmetros referentes à partícula, fluido e poço.....	83
Tabela 5 – Influência dos parâmetros ( <i>a</i> ) e ( <i>b</i> ) no grau de gelificação, viscosidade, velocidade e deslocamento das partículas.....	102

## SIGLAS- VARIÁVEIS –SÍMBOLOS

Bob – peça que compõe o viscosímetro.

Fluido A (emulsão inversa).

Fluido B (à base de goma xantana).

Fluido C (à base de carbopol).

Gap – distância entre placas da geometria do reômetro.

Grooved Couette - geometria ranhurada utilizada em reômetros.

HPHT – High Pressure High Temperature (alta pressão e alta temperatura).

Kelly – equipamento utilizado em conjunto com a mesa rotativa para promover a perfuração do poço.

Offshore – ambiente localizado no mar.

Onshore - ambiente localizado na terra.

ppm – partes por milhão.

PWDa, - interpretador de dados de pressão de fundo de poço em tempo real durante a perfuração.

RPM: número de rotações por minuto.

SIMCARR – Simulador de Hidráulica de Perfuração e Carreamento de Cascalhos.

Top drive - equipamento utilizado para promover a perfuração do poço.

$a$  - aceleração ( $m/s^2$ ).

$a$  e  $b$  - parâmetros obtidos do ensaio reológico da viscosidade em função do tempo ( $a = Pa.s^n$  e  $b =$  adimensional).

$a$ ,  $b$ ,  $c$ , e  $d$  - constantes utilizadas para determinação do coeficiente de arraste que dependem da natureza e forma de um determinado tipo de partícula (adimensional).

$A$  - área da seção transversal de fluidização ( $m^2$ ).

$A_p$  - área da superfície da partícula ( $m^2$ ).

$A_s$  - área da superfície de uma esfera de mesmo volume da partícula ( $m^2$ ).

$C$  - fator de conversão da tensão de cisalhamento para um dado *bob* (adimensional).

$C_r$  ou  $C_D$  - coeficiente de atrito ou resistência ao fluxo (adimensional).

$C_v$  - fração volumétrica da fase sólida na suspensão (adimensional).

$d_a$  – diâmetro do anular (m).

$d_h$  - diâmetro hidráulico do espaço anular (m), (Sá, 1990).

$d_i$  - diâmetro externo da coluna de perfuração (m), (Sá, 1990).

$d_o$  - diâmetro do poço (m), (Sá, 1990).  
 $d_p$  - diâmetro da partícula (m).  
 $D_p$  - diâmetro do poço (m).  
 $d_t$  - diâmetro do tubo de perfuração (m).  
 $d_I$  - diâmetro interno do espaço anular (m), (Bourgoyne, 2005).  
 $d_2$  - diâmetro externo do espaço anular (m), (Bourgoyne, 2005).  
 $E$  - empuxo (N).  
 $f$  - fator de mola do viscosímetro (adimensional).  
 $F$  - força resultante atuante na partícula (N).  
 $F_r$  - força resistiva atuante na partícula (N).  
 $F_w$  - fator de correlação da velocidade com fronteiras rígidas (adimensional), (Sá, 1990);  
 $g$  - aceleração gravitacional ( $m/s^2$ ).  
 $k$  - índice de consistência ( $Pa.s^n$ ).  
 $k_\beta$  - fator de correlação da velocidade com fronteiras rígidas (adimensional).  
 $k_{cv}$  - fator de correlação da velocidade com a concentração de partículas (adimensional).  
 $k_\epsilon$  - fator de correlação da velocidade com a esfericidade (adimensional).  
 $L$  - leitura da deformação da mola obtida para dada rpm do viscosímetro (adimensional).  
 $m$  - parâmetro do método das assíntotas (adimensional), (Churchill, 1983).  
 $m_f$  - massa do fluido (Kg).  
 $m_p$  - massa da partícula (Kg).  
 $n$  - índice de comportamento do modelo de potência (adimensional).  
 $n$  - expoente da equação de Richardson e Zaki (1954) (adimensional).  
 $N$  - rotação (SIMCARR)  
 $P$  - peso da partícula (N).  
 $Q$  - vazão de fluido ( $m^3/s$ ).  
 $r_p$  - raio da partícula (m).  
 $Re$  - número de Reynolds (adimensional).  
 $R_t$  - razão de transporte (adimensional).  
 $Re^*$  - número de Reynolds generalizado (adimensional), (Sá et al., 1996).  
 $Re_w$  - número de Reynolds referente ao efeito de parede (adimensional), (Sá et al., 1996).  
 $Re_\infty$  - número de Reynolds referente à velocidade terminal da partícula isolada (adimensional), (Almeida, 1995);

$s$  – deslocamento da partícula (m).  
 $s$  – expoente relativo à velocidade de um grupo de partículas (adimensional), (Sá, 1990).  
SD – desvio padrão (SIMCARR).  
SRb – taxa de deformação (SIMCARR).  
SSb Calc - tensão cisalhante prevista pelo modelo reológico escolhido (SIMCARR).  
SSb lido – tensão cisalhante lida no reômetro (SIMCARR).  
T – ângulo de deflexão (SIMCARR).  
TXD (1) - taxa de deformação nominal de 1 rpm do viscosímetro para uma dada combinação *rotor – bob* (adimensional).  
U - módulo da velocidade relativa fluido/partícula (m/s);  
 $v$  - velocidade da frente de sedimentação (m/s).  
 $v_{\beta}$  - velocidade corrigida para o efeito de fronteiras rígidas (m/s).  
 $v_{c_v}$  - velocidade corrigida para o efeito de outras partículas (m/s).  
 $v_{\epsilon}$  - velocidade corrigida para o efeito de forma (m/s).  
 $v_f$  - velocidade média de escoamento do fluido carreador (m/s).  
 $v_i$  - velocidade intersticial do fluido (m/s).  
 $v_p$  – velocidade das partículas levando em consideração a variação da viscosidade.  
 $v_s$  - velocidade terminal de sedimentação da partícula (m/s).  
 $v_{sp}$  – velocidade de sedimentação de partículas (m/s), (Bourgoyne, 2005).  
 $v_t$  - velocidade média de transporte (m/s).  
 $v_w$  – velocidade corrigida para o efeito de parede (m/s), (Sá, 1990).  
 $v_{\infty}$  - velocidade terminal da partícula esférica isolada (m/s).  
 $V_p$  - volume da partícula (m<sup>3</sup>).  
  
 $\beta$  - relação entre diâmetro da partícula e do tubo (adimensional).  
 $\gamma$  - taxa de deformação (s<sup>-1</sup>).  
 $\eta$  - viscosidade aparente do fluido (Pa.s).  
 $\eta_0$  - viscosidade aparente do fluido imediatamente antes da gelificação (Pa.s).  
 $\mu_a$  - viscosidade aparente (Pa.s), (Bourgoyne, 2005).  
 $\mu_p$  - viscosidade plástica (Pa.s).  
 $\rho_f$  - massa específica do fluido (Kg/m<sup>3</sup>).  
 $\rho_p$  – massa específica da partícula (Kg/m<sup>3</sup>).



$\tau$  - tensão de cisalhamento (Pa).

$\tau_0$  - tensão limite de escoamento (Pa).

$\tau_w$  - tensão líquido/sólido (adimensional), (Sá, 1990).

$\phi$  - porosidade (fração volumétrica de fluido na suspensão) (adimensional).

$\Pi_1$  - relação entre diâmetro da partícula e diâmetro hidráulico (adimensional), (Sá, 1990).

$\Pi_2 = Re_w$  - número de Reynolds corrigido para o efeito de parede (adimensional), (Sá, 1990).

---

## Capítulo 1

### Introdução Geral

---

## 1.1 Utilização de fluidos para perfuração de poços

Na perfuração rotativa utilizada em poços de petróleo, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade da coluna de perfuração. Os fragmentos da rocha são continuamente removidos através do fluido de perfuração, que é injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração, retornando posteriormente pelo espaço anular formado entre o poço e a coluna de perfuração.

Numa determinada profundidade, é retirada a coluna de perfuração e é descido um revestimento de aço que é cimentado para prover isolamento das rochas atravessadas e permitir o avanço da perfuração com segurança. Após essa operação de cimentação, uma broca de menor diâmetro é descida para prosseguir com a perfuração até a profundidade desejada.

Atualmente, os fluidos de perfuração são constituídos por misturas complexas de sólidos, líquidos e até gases. Podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes. Eles devem ser especificados para promover uma operação rápida e segura, apresentando algumas características especiais (THOMAS, 2001):

- Estabilidade química;
- Facilitar interpretações geológicas do material retirado do poço;
- Ser bombeável;
- Não causar danos às rochas produtoras;
- Facilitar a separação dos cascalhos na superfície;
- Estabilizar as paredes do poço;
- Manter os sólidos em suspensão quando estiver em repouso;
- Aceitar tratamentos físicos e químicos;
- Apresentar baixo grau de corrosão e abrasão em relação à coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação;
- Apresentar custo compatível com a operação.

## 1.2 Transporte de cascalhos durante bombeio e em condições estáticas

O desafio da perfuração em campos *onshore* e *offshore* considerados de lâminas d'águas ultra-profundas e de trajetórias com grandes desvios e afastamentos, tem levado a indústria do petróleo a buscar metodologias que reduzam as operações de paradas durante a perfuração de um poço, além da otimização do transporte dos cascalhos gerados durante o corte da formação pela broca. Dentre as funções dos fluidos na perfuração de poços de óleo e gás, a eficiência do transporte dos cascalhos gerados do fundo do poço até a superfície é de suma importância, e está diretamente ligada às propriedades reológicas desses fluidos.

O projeto dos fluidos deve contemplar característica de baixa viscosidade em altas vazões, para reduzir ao máximo as perdas de carga, e altas viscosidades em baixas vazões, para não prejudicar a capacidade de carrear os sólidos mesmo em velocidades baixas. Adicionalmente, paradas de bombeio ocorrem com frequência durante a perfuração de um poço, tornando desejável que o fluido apresente uma característica denominada gelificação.

A gelificação começa quando o fluido fica em repouso e é uma propriedade fundamental em fluidos de perfuração, pois evita que sólidos que vinham sendo transportados sedimentem quando a bomba é desligada. A tendência à gelificação é maior em baixas temperaturas, típicas de águas profundas, cada vez mais comuns no cenário *offshore* brasileiro. Entretanto, após a formação da estrutura gelificada, a energia requerida para quebrá-la e recomeçar o escoamento do fluido pode ser maior e, conseqüentemente, um pico de pressão pode ser gerado. Desta forma, o fluido gelificado pode induzir picos de pressão quando a bomba é religada, podendo atingir a pressão de fratura da formação, trazendo riscos à operação. Portanto, o fluido deve apresentar um aumento rápido e não progressivo de sua gelificação, evitando picos de pressão quando a circulação for retomada (PINTO, 2008).

## **1.3 Objetivo do trabalho**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Este trabalho se propõe a avaliar a cinemática de partículas em fluidos de viscosidade variável com o tempo e com a taxa de deformação, em condições isotérmicas, propondo um modelo para a equação de velocidade de partículas para possibilitar a determinação do deslocamento das partículas depois de paradas operacionais durante a perfuração de um poço de petróleo, tais como, conexões e manobras, e verificar se com determinadas propriedades reológicas, o fluido pode ser utilizado de maneira segura durante a operação.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Quando a viscosidade varia com o tempo e com a taxa de deformação, deve-se seguir um procedimento iterativo para determinar a viscosidade do fluido de perfuração, que por sua vez será utilizada para determinação da velocidade e do deslocamento das partículas dentro do poço.

---

## Capítulo 2

### Aspectos Teóricos

---

## 2.1 Transporte de sólidos

O transporte de sólidos do fundo do poço até a superfície através do espaço anular está entre as principais funções dos fluidos de perfuração. As forças atuantes no sistema devem ser descritas e correlacionadas para obtenção de expressões representativas da velocidade das partículas.

### 2.1.1 Velocidade relativa de partículas em meios contínuos

Quando a partícula inicia o movimento através do fluido de viscosidade constante, ela acelera devido ao efeito do campo gravitacional até atingir a velocidade terminal. A velocidade terminal ocorre quando a força de arraste somada ao empuxo se igualam ao peso da partícula. Neste momento, a velocidade da partícula é máxima e constante.

A velocidade de sedimentação depende de propriedades da partícula, tais como densidade, tamanho e geometria, além das propriedades do fluido. Para indicar as forças que atuam sobre a esfera, um diagrama de corpo livre pode ser avaliado. A Figura 1 apresenta o diagrama de corpo livre no qual a esfera sedimenta através de uma coluna de fluido.

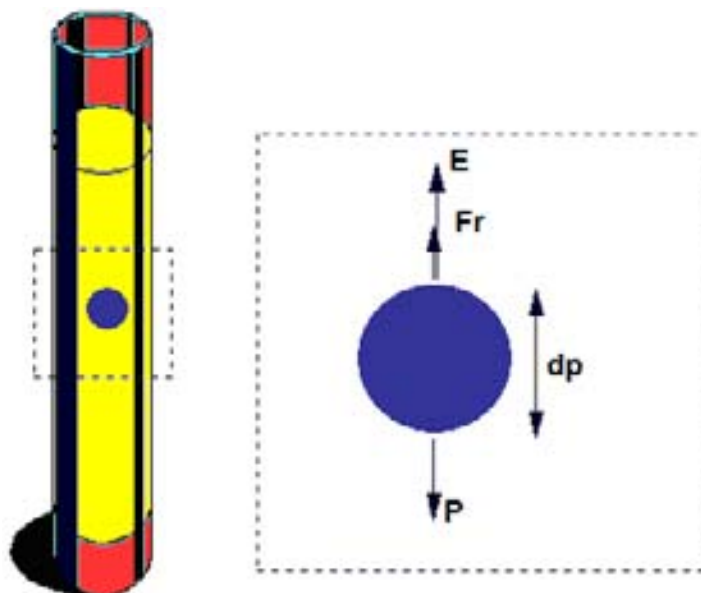


Figura 1 - Diagrama de corpo livre da esfera

De acordo com o princípio da inércia, se a resultante de forças atuantes num corpo for nula, o corpo consegue manter, por inércia, sua velocidade constante, ou seja, não possui aceleração. Logo, força consiste num agente físico capaz de produzir aceleração, alterando o estado de repouso ou de movimento dos corpos. O Princípio Fundamental ou Segunda Lei de Newton diz que quando uma força resultante  $F$  está presente em uma partícula, esta adquire uma aceleração  $a$  na mesma direção e sentido da força, segundo um referencial inercial, conforme a Equação (2.1).

$$\sum F = m.a \quad (2.1)$$

Para o caso do diagrama de corpo livre em questão, a Equação (2.2) representa o balanço de forças.

$$m \frac{dv}{dt} = P - E - F_r \quad (2.2)$$

Onde:

P – peso da partícula;

E – empuxo;

$F_r$  – Força resistiva.

Quando a velocidade terminal é atingida, a aceleração é anulada, conforme Equação (2.3), e conseqüentemente a resultante das forças, conforme a Equação (2.4).

$$\frac{dv}{dt} = 0 \quad (2.3)$$

$$P - E - F_r = 0 \quad (2.4)$$

O balanço de forças se transforma em:

$$P = E + F_r \quad (2.5)$$



A força agindo no sentido descendente, o peso da esfera (**P**), resultante da atração gravitacional é descrita pela Equação (2.6).

$$P = m_p \cdot g \quad (2.6)$$

Onde:

$m_p$  - massa da partícula;

$g$  - aceleração gravitacional.

Um fluido em equilíbrio age sobre um corpo nele imerso, parcial ou totalmente, como uma força vertical de baixo para cima, denominada empuxo, aplicada no centro de gravidade do volume de fluido deslocado cuja intensidade é igual ao peso do volume de fluido deslocado.

Considerando o volume de líquido deslocado igual ao volume da partícula, empuxo é descrito por:

$$E = m_f \cdot g \quad (2.7)$$

Onde:

$m_f$  - massa do fluido deslocado.

A força resistiva pode ser definida pela equação de Stokes, que descreve o movimento de corpos esféricos em meio viscoso para regime laminar:

$$F_r = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_p \cdot v_s \quad (2.8)$$

Onde:

$\eta$  - viscosidade do fluido;

$r_p$  - raio da partícula;

$v_s$  - velocidade terminal de sedimentação da partícula.

Substituindo a Equação (2.6), (2.7) e (2.8) em (2.5), obtém-se:

$$m_p \cdot g = m_f \cdot g + 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_p \cdot v_s \quad (2.9)$$

A massa da partícula e do fluido podem ser correlacionadas com a massa específica da partícula  $\rho_p$  e do fluido  $\rho_f$  e com o volume da partícula  $V_p$  pela Equação (2.10).

$$\rho_p \cdot V_p \cdot g = \rho_f \cdot V_p \cdot g + 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_p \cdot v_s \quad (2.10)$$

Colocando o volume da partícula e a aceleração gravitacional em evidência, obtém-se a Equação (2.11).

$$(\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot V_p = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_p \cdot v_s \quad (2.11)$$

Onde o volume da partícula:

$$V_p = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \quad (2.12)$$

Portanto, substituindo a Equação (2.12) na (2.11), obtém-se a Equação (2.13).

$$(\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot \frac{4}{3} \pi r_p^3 = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_p \cdot v_s \quad (2.13)$$

Reagrupando os termos da Equação (2.13), obtém-se:

$$(\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot 4 r_p^2 = 18 \eta \cdot v_s \quad (2.14)$$

Onde a relação:  $4 r_p^2 = d_p^2$

E finalmente, a velocidade terminal da partícula através do fluido será representada pela Equação (2.15).

$$v_s = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot d_p^2}{18 \eta} \quad (2.15)$$

A força resistiva pode ser expressa em função do coeficiente de resistência, que depende do tamanho, geometria, rugosidade e regime de queda da partícula. Para se construir expressões que possibilitem a determinação da velocidade de sedimentação em termos de propriedades mensuráveis da partícula e do fluido é necessário construir um gráfico de coeficiente de resistência em função do número de Reynolds.

A força resistiva é proporcional à massa específica do fluido, área de projeção da partícula  $S_p$  e ao quadrado da velocidade de sedimentação  $v_s^2$ , conforme definido por John William Strutt (*Lord Rayleigh*) através da Equação (2.16).

$$F_r = \frac{C_r}{2} \cdot \rho_f \cdot S_p \cdot v_s^2 \quad (2.16)$$

Onde:

$C_r$  - coeficiente de atrito ou resistência ao fluxo.

Substituindo as Equações (2.6), (2.7) e (2.16) em (2.5), obtemos a Equação (2.17).

$$v_s = \left( \frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \cdot g \cdot \frac{V_p}{S_p \cdot C_r} \right)^{0,5} \quad (2.17)$$

O volume da partícula dividido pela sua área de projeção pode ser substituído por um parâmetro unidimensional definido por diâmetro equivalente da partícula que corresponde ao volume de uma esfera de igual volume que uma partícula. Logo, a Equação (2.17) pode ser substituída pela Equação (2.18).

$$v_s = \left( \frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \cdot g \cdot \frac{d_p}{C_r} \right)^{0,5} \quad (2.18)$$

A partir de tendências observadas de dados experimentais, as equações que correlacionam o coeficiente de resistência com o número de Reynolds podem ser definidas genericamente por:

$$C_r = \frac{a}{Re} \quad (\text{Regime Laminar; } Re < 1) \quad (2.19)$$

$$C_r = \frac{b}{Re^c} \quad (\text{Regime intermediário; } 1 < Re < 1000) \quad (2.20)$$

$$C_r = d \quad (\text{Regime turbulento; } Re > 1000) \quad (2.21)$$

Onde:

a, b, c, e d são constantes que dependem da natureza e forma de um determinado tipo de partícula (MACHADO, 2002).

O número de Reynolds de queda de partícula pode ser definido por:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v_s \cdot d_p}{\eta} \quad (2.22)$$

Para fluidos Newtonianos, a viscosidade é constante para uma dada condição de taxa de cisalhamento, temperatura e pressão. Já os fluidos não-Newtonianos apresentam viscosidade variável com taxa de cisalhamento mesmo a uma temperatura e pressão definidas. Portanto, uma viscosidade efetiva deve ser determinada para uma dada condição de escoamento quando o fluido for não-Newtoniano.

Para partículas esféricas, por exemplo, em regime de queda muito lento ( $Re < 1$ ),  $a = 24$ , portanto  $C_r = \frac{24}{Re}$  e a equação para velocidade da partícula se transforma na Equação (2.15).

Existem diversas correlações para representação da queda de uma partícula em um fluido não-Newtoniano, entretanto cada autor ajusta um determinado modelo reológico que melhor caracteriza o comportamento do fluido, o que por sua vez gera alguns inconvenientes quando se deseja realizar uma análise comparativa entre as mesmas.

Em trechos inclinados e horizontais o processo torna-se mais complexo. Neste caso, as forças devido à gravidade e ao arraste não atuam na mesma direção. Enquanto a

primeira age na direção vertical, a segunda atua na direção do poço, conforme apresentado na Figura 2.

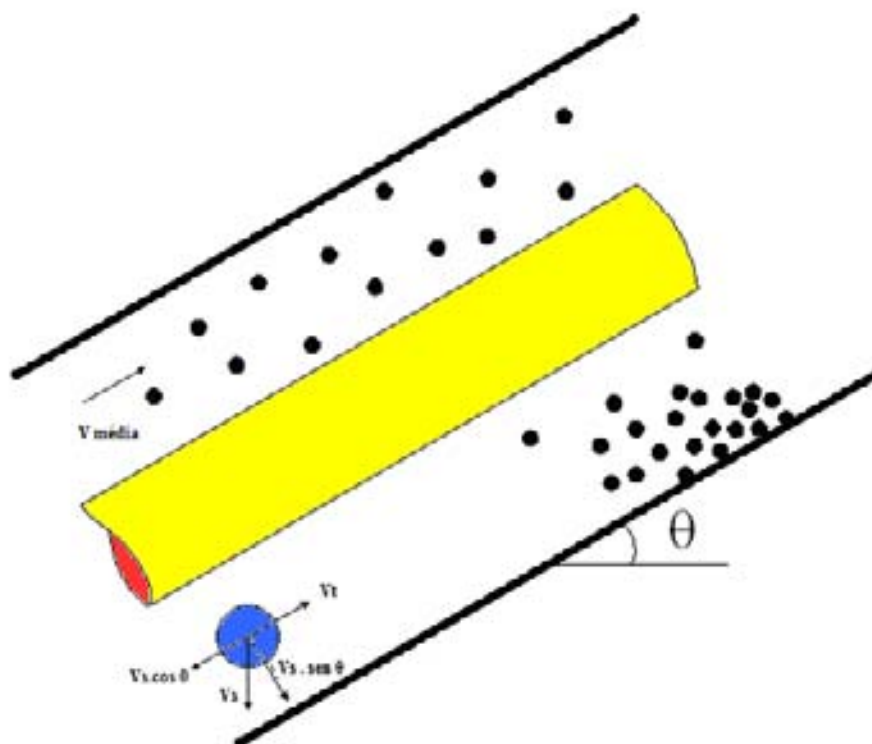


Figura 2 - Transporte de sólidos em trechos inclinados e horizontais

Deste modo, a força gravitacional decomposta em duas componentes ortogonais gera uma força na direção do escoamento (causando atraso da ascensão das partículas em suspensão),  $v_s \cdot \cos \theta$  e outra na direção perpendicular ao eixo do poço (empurrando os sólidos na direção da parede inferior do poço, tendendo a formar um leito),  $v_s \cdot \sin \theta$ .

Portanto, o transporte de sólidos em poços inclinados e horizontais não é caracterizado exclusivamente pela velocidade relativa do sólido. É necessário considerar também a quantidade total de sólidos presentes no anular. Assim as variáveis mais usadas para caracterizar o problema são: o padrão de escoamento (existência ou não de leito), a altura do leito e a concentração volumétrica de sólidos (MACHADO, 2002).

Poços inclinados e de grande afastamento com relação à vertical merecem uma atenção maior relativa ao mecanismo de transporte de sólidos pelo fluido de perfuração visto que no trecho de alta inclinação há tendência dos cascalhos separarem-se da suspensão formando um leito na parte inferior. Em poços delgados, onde o espaço

anular é menor do que o usual, este efeito torna-se mais crítico devido ao pequeno espaço disponível para as partículas que estão sendo carregadas além de aumentar o efeito de fronteiras rígidas que tendem a reduzir a velocidade das partículas.

A velocidade média de transporte  $v_t$  pode ser definida pela diferença entre a velocidade média de escoamento do fluido carreador  $v_f$  e a velocidade média de sedimentação das partículas  $v_s$ , conforme apresentado pela Equação (2.23).

$$v_t = v_f - v_s \quad (2.23)$$

Além da velocidade de escoamento ser controlada pela vazão de bombeio, existem ainda fatores referentes às características da partícula e do poço que influenciam diretamente na velocidade de sedimentação, dentre eles destacam-se o efeito de fronteiras rígidas que está relacionado com o diâmetro da partícula e do poço; o efeito de concentração de partículas, relacionado diretamente à quantidade de partículas no meio e o efeito de forma que trata da esfericidade da partícula.

### 2.1.2 Razão de transporte

A razão de transporte  $R_t$  definida como a relação entre a velocidade de remoção ou de transporte e a velocidade média de escoamento do fluido carreador é o parâmetro de controle do carregamento dos sólidos em um fluido em escoamento em trechos verticais, conforme definido pela Equação (2.24):

$$R_t = \left( \frac{v_t}{v_f} \right) = \left( 1 - \frac{v_s}{v_f} \right) \quad (2.24)$$

Ou seja, a razão de transporte aumenta com a diminuição da velocidade de sedimentação ou com o aumento da velocidade média de escoamento. Quando a velocidade de sedimentação for igual a zero, a razão de transporte é igual à unidade, inferindo que os cascalhos serão transportados com a mesma velocidade do fluido.

Nos casos em que a velocidade de sedimentação aumenta, a concentração de sólidos no anular também aumenta e problemas relacionados à redução na taxa de penetração, redução da vida útil da broca, perda de circulação, obstrução do anular e prisão da coluna de perfuração podem ocorrer.

### **2.1.3 Influência da taxa de deformação e do tempo na viscosidade**

A estimativa da viscosidade é de fundamental importância para determinação do comportamento das partículas dentro do poço depois de paradas operacionais. A classificação dos fluidos em relação ao comportamento reológico envolve a determinação e análise da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para uma determinada condição de pressão e temperatura. Os fluidos Newtonianos são aqueles que obedecem à lei de Newton, onde a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação e a viscosidade é constante, para certas condições de temperatura e pressão.

Em fluidos não-Newtonianos, a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação. Em um gráfico de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação, eles não são lineares ou não passam pela origem. Podem ser dependentes e independentes do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento.

Além destes existem ainda os viscoelásticos, os quais apresentam tanto características de sólido como de líquido. Para estes fluidos, a viscosidade está associada à dissipação de energia e a elasticidade ao armazenamento. No instante em que a tensão de cisalhamento cessa, ocorre certa recuperação da deformação ocorrida. Sistemas reais comportam-se como sólidos e líquidos, logo, para um material viscoelástico, uma parcela da tensão aplicada poderá ser parcialmente recuperada, devido às propriedades elásticas, enquanto que parte dela poderá ser dissipada devido às propriedades viscosas.

### **2.1.4 Taxa de deformação característica do processo de sedimentação**

Além da escolha do sistema de medida apropriado é de fundamental importância a escolha da faixa correta da taxa de cisalhamento para a realização dos ensaios experimentais.

A formulação clássica sobre a dinâmica da partícula sólida em fluidos Newtonianos pode ser estendida para contemplar fluidos não-Newtonianos, fazendo uso da viscosidade efetiva que pode ser relacionada com a tensão cisalhante (propriedade material do fluido) e da taxa de deformação (propriedade cinemática do escoamento) (MASSARANI, 1997).

Para o caso de fluidos não-Newtonianos, a viscosidade que consta na equação do número de Reynolds pode ser substituída pela viscosidade efetiva, “ $\eta$ ”, que é função da taxa de deformação.

$$\text{Re} = \frac{\rho_f \cdot v_s \cdot d_p}{\eta} \quad (2.25)$$

$$\eta = f(\dot{\gamma}) \quad (2.26)$$

A taxa de deformação característica pode ser determinada empiricamente através da relação proporcional entre a velocidade terminal experimental e o diâmetro da partícula.

$$\dot{\gamma} = \alpha \left( \frac{v_s}{d_p} \right) \quad (2.27)$$



---

## Capítulo 3

### Estado da Arte

---

### 3.1 Influência da forma da partícula

Estudos experimentais comprovaram que a forma da partícula influencia na velocidade de sedimentação de partículas. Waddel, (1934) adaptou a relação de Newton para determinar uma velocidade de sedimentação de partículas de forma irregular introduzindo um fator de correção para a forma, denominado esfericidade, conforme definido pela Equação (3.1).

$$\varepsilon = \frac{A_s}{A_p} \quad (3.1)$$

Onde:

$\varepsilon$  - esfericidade;

$A_s$  - área da superfície de uma esfera de mesmo volume da partícula;

$A_p$  - área da superfície da partícula.

Para correlacionar a esfericidade com a equação de velocidade, definiu-se um parâmetro  $k_\varepsilon$  que está relacionado com a esfericidade conforme a Equação (3.2), para  $Re < 0,5$  (PETTYJOHN, 1948).

$$k_\varepsilon = 0,843 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon}{0,065}\right) \quad (3.2)$$

E a velocidade corrigida para o efeito de forma é relacionada pela Equação (3.3):

$$k_\varepsilon = \frac{v_\varepsilon}{v_\infty} \quad (3.3)$$

Onde:

$v_\infty$  - velocidade terminal da partícula isolada (esférica);

$v_\varepsilon$  - velocidade corrigida para o efeito de forma.

Laruccia, (1990) realizou experimentos de fluidização com fluidos não Newtonianos e partículas irregulares em geometria tubular e também verificou variações na velocidade de sedimentação. Chien, (1994) propôs uma correlação para a

faixa de escoamento turbulento e laminar do coeficiente de arraste, com o número de Reynolds e com a esfericidade.

$$C_D = \left( \frac{30}{Re} \right) + \frac{67,289}{e^{5,030\varepsilon}}, \text{ para } 0,2 \leq Re \leq 1,0 \quad (3.4)$$

A partir da definição de Dedegil, (1987) para o coeficiente de arraste e para o número de Reynolds generalizado, dos resultados experimentais de Valentik e Whitmore (1965), Hottovy e Sylvester (1979), Walker e Mayes (1975), e Hopkin (1967), e utilizando o método das assíntotas de Churchill (1983), Sá et al., (1996) chegaram a uma expressão que correlaciona o coeficiente de arraste modificado, o número de Reynolds generalizado e a esfericidade, conforme apresentado pela Equação (3.5).

$$C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re^*} \right)^m + \left( \frac{103,3}{e^{5,441\varepsilon}} \right)^m \right]^{1/m}, \text{ para } 0,4 \leq Re \leq 1,0 \quad (3.5)$$

$$m = 0,9779 - 0,1557\varepsilon \quad (3.6)$$

Onde:

$$Re^* = \frac{v_\infty^2 \rho_f}{\tau}$$

Re\* - número de Reynolds generalizado.

$\tau$  - tensão de cisalhamento.

### 3.2 Influência de fronteiras rígidas

Estudos experimentais comprovaram que fronteiras rígidas influenciam na velocidade de sedimentação de partículas. O movimento de uma partícula isométrica ao longo do eixo principal de um tubo cilíndrico de diâmetro  $d_t$  foi avaliado por Francis, (1933). A Equação (3.7) é utilizada para esfericidade entre  $0,65 < \varepsilon < 1$ , relação entre diâmetros partícula/tubo  $0 < \beta < 0,5$  e  $Re < 0,1$ .

$$k_{\beta} = \left( \frac{1 - \beta}{1 - 0,475\beta} \right)^4 \quad (3.7)$$

Onde:

$k_{\beta}$  - fator de correlação da velocidade com fronteiras rígidas;

$\beta = \frac{d_p}{d_t}$  - relação entre diâmetro da partícula e do tubo.

Para  $Re > 1000$ , a correlação é apresentada pela Equação (3.8).

$$k_{\beta} = (1 - \beta)^{3/2} \quad (3.8)$$

Para uma região intermediária  $0,1 < Re < 1000$ , Almeida, (1995) propôs a seguinte correlação:

$$k_{\beta} = \left( \frac{10}{1 + A \cdot Re_{\infty}^B} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

$$A = 8,91 \cdot e^{2,79\beta} ;$$

$$B = 1,17 \times 10^{-3} - 0,281 \cdot \beta$$

$Re_{\infty}$  - número de Reynolds referente à velocidade terminal da partícula isolada;

A velocidade corrigida para o efeito de fronteiras rígidas se relaciona com o fator de correlação da velocidade com fronteiras rígidas através da Equação (3.10).

$$k_{\beta} = \frac{v_{\beta}}{v_{\infty}} \quad (3.10)$$

Onde:

$v_{\beta}$  - velocidade corrigida para o efeito de fronteiras rígidas.

Trabalhos desenvolvidos usando fluidos Newtonianos podem ser citados da literatura, como por exemplo, o trabalho clássico de Newton e o estudo proposto por

Munroe (FIDLERIS E WHITMORE, 1961), que investigaram os efeitos de parede na sedimentação de partículas esféricas no regime Newtoniano ( $Re > 1000$ ).

Para fluidos não-Newtonianos, trabalhos relacionados ao movimento de partículas foram apresentados por Massarani e Silva Teles, (1978) e Laruccia, (1990). Utilizando outra metodologia, Chhabra et al., (1981) quantificou o efeito de fronteiras rígidas na queda de partículas esféricas movendo-se lentamente, para  $0 < \beta < 0.5$ .

Nos experimentos de Sá, (1990) os diâmetros de partículas não eram desprezíveis com relação ao diâmetro hidráulico da região anular e, portanto, havia manifestação do efeito de parede.

Uma forma de se expressar esta velocidade foi correlacionando-a com a velocidade de queda da mesma partícula em um meio infinito:

$$F_w = \frac{v_w}{v_\infty} \quad (3.11)$$

Onde:

$F_w$  - fator de correlação da velocidade com fronteiras rígidas;

$v_w$  – velocidade corrigida para o efeito de parede.

Através de análise dimensional, Sá, (1990) correlacionou o fator  $F_w$  com os seguintes números adimensionais relevantes:

$$\Pi_1 = \frac{d_p}{d_h} \quad (3.12)$$

$$\Pi_2 \equiv Re_w = \frac{\rho_f v_w^2}{\tau_w} \quad (3.13)$$

$$d_h = 0,816(d_o - d_i) \quad (3.14)$$

Onde:

$d_h$  - diâmetro hidráulico do espaço anular;

$d_i$  - diâmetro externo da coluna de perfuração;

$d_o$  - diâmetro do poço;

$\tau_w$  - tensão líquido/sólido;

$Re_w$  - número de Reynolds referente ao efeito de parede;

$\Pi_1$  - relação entre diâmetro da partícula e diâmetro hidráulico;

$\Pi_2$  - número de Reynolds corrigido para o efeito de parede.

A equação descrita para o fator de correlação da velocidade com fronteiras rígidas foi:

$$F_w = 1 - 0,264 \left( \frac{d_p}{d_h} \right)^{0,215} Re_w^{0,351}, \text{ para } 1 < Re_w < 20 \quad (3.15)$$

Teixeira e Frota, (2001) também observaram o efeito de parede para partículas esféricas em fluidos Newtonianos e não Newtonianos.

Através da extrapolação da velocidade de queda de uma dada partícula com efeito de parede e do cálculo da velocidade de queda da mesma partícula em um meio infinito, isto é, sem efeitos de parede, Sá et al., (1996) determinaram uma correlação entre o fator de correção para o efeito de parede e os números adimensionais relevantes.

$$F_w = \frac{v_w}{v_\infty} = 1 - 0,800 \left( \frac{d_p}{d_h} \right)^{0,690} Re_w^{0,042}, \text{ para } 1 < Re_w < 3500 \quad (3.16)$$

### 3.3 Influência da concentração de partículas

Estudos experimentais avaliaram que a concentração de partículas influenciam na velocidade de sedimentação. Richardson e Zaki, (1954) realizaram vários experimentos de fluidização com partículas esféricas, fluidos Newtonianos e geometria cilíndrica. A relação entre a velocidade intersticial do fluido  $v_i$  e a porosidade (fração volumétrica de fluido na suspensão) do leito  $\phi$  é apresentada pela Equação (3.17).

$$\frac{v_i}{v_\infty} = \phi^n \quad (3.17)$$

Como eles trabalharam com diâmetros de partículas bastante pequenos com relação ao diâmetro do recipiente, os efeitos de parede foram desprezíveis e a velocidade intersticial do fluido se iguala à velocidade de queda de uma partícula no meio infinito. Eles desenvolveram correlações entre o expoente  $n$  da Equação (3.17), obtido através do cálculo da tangente no gráfico  $\log(v_i)$  em função de  $\log(\phi)$ , e números adimensionais relevantes para diferentes faixas de número de Reynolds.

$$n = \left( 4,35 + 17,5 \frac{d_p}{d_t} \right) Re^{-0,03}, \text{ para } 0,2 < Re < 1 \quad (3.18)$$

$$n = \left( 4,45 + 18 \frac{d_p}{d_t} \right) Re^{-0,1}, \text{ para } 1 < Re < 200 \quad (3.19)$$

$$n = 4,45 Re^{-0,1}, \text{ para } 200 < Re < 500 \quad (3.20)$$

A redução da velocidade terminal de uma partícula devido à presença de outras partículas também foi estudada por Govier, (1972):

$$k_{cv} = \frac{1}{1 + 2,5C_v} \quad (3.21)$$

e

$$\frac{v_{c_v}}{v_\infty} = k_{cv} \quad (3.22)$$

Onde:

$C_v$  - fração volumétrica da fase sólida na suspensão;

$k_{cv}$  - fator de correlação da velocidade com a concentração de partículas;

$v_{c_v}$  - velocidade corrigida para o efeito de outras partículas.

Segundo Massarani, 1997 o efeito da presença da fase particulada na fluidodinâmica de suspensões é comumente expresso através de relações do tipo:

$$\frac{U}{v_\infty} = f(Re_\infty, \phi) \quad (3.23)$$

Onde:

$U$  - módulo da velocidade relativa fluido/partícula;

$Re_{\infty}$  - número de Reynolds referente à velocidade terminal da partícula isolada;

$\phi$  - porosidade (fração volumétrica de fluido na suspensão).

$$Re_{\infty} = \frac{\rho_f \cdot v_{\infty} \cdot d_p}{\eta} \quad (3.24)$$

$$\phi = 1 - C_v \quad (3.25)$$

De acordo com Barnea, 1973 as correlações referentes à Equação (3.23) podem ser determinadas através de experimentação conduzida na sedimentação em batelada e na fluidização homogênea. No primeiro caso  $U = \frac{v}{\phi}$ , e no segundo caso  $U = \frac{Q}{\phi \cdot A}$ .

Onde:

$v$  - velocidade da frente de sedimentação;

$Q$  - vazão de fluido;

$A$  - área da seção transversal de fluidização.

Caso a faixa granulométrica das partículas seja extensa e a concentração de sólidos reduzida (inferior a 5% em volume) a experimentação torna-se imprecisa, resultando numa interface fluido/suspensão pouco nítida devido problemas de segregação de partículas.

A influência de vários tamanhos e formas de partículas tem sido estudada através da elaboração de gráficos de fator de fricção em função de  $Re$ .

Sá (1990), trabalhando com partículas esféricas, fluidos não-Newtonianos, geometria anular e utilizando o conceito do diâmetro hidráulico advindo da aproximação da fenda plana, também chegou à relação entre a velocidade intersticial do fluido  $v_i$  e a porosidade do leito  $\phi$ , conforme Richardson e Zaki (1954).

$$\frac{v_i}{v_w} = \phi^s \quad (3.26)$$

Onde:



$s$  – expoente relativo à velocidade de um grupo de partículas.

A correlação para o expoente  $s$  obtida através de seus experimentos é apresentada na Equação 3.27.

$$s = \left( 4,07 + 3,96 \frac{d_p}{d_h} \right) \text{Re}_w^{-0,211}, \text{ para } 1 < \text{Re}_w < 20 \quad (3.27)$$

Sá et al., (1996) em estudos posteriores chegaram a seguinte correlação para o expoente  $s$ , abrangendo uma maior faixa do  $\text{Re}_w$ :

$$s = \left( 3,44 + 2,66 \frac{d_p}{d_h} \right) \text{Re}_w^{-0,082}, \text{ para } 1 < \text{Re}_w < 3500 \quad (3.28)$$

### 3.4 Taxa de deformação característica do processo de sedimentação

A formulação clássica sobre a dinâmica da partícula sólida em fluidos Newtonianos pode ser estendida para contemplar fluidos não-Newtonianos, fazendo uso da viscosidade efetiva que pode ser relacionada com a tensão cisalhante (propriedade material do fluido) e da taxa de deformação (propriedade cinemática do escoamento) (MASSARANI, 1997).

A partir de resultados experimentais obtidos para dinâmica da partícula isolada e considerações do efeito de parede e concentração foi possível determinar uma correlação entre a taxa de deformação e a velocidade da partícula.

Massarani e Silva Telles, (1978) consideraram o efeito de concentração na fluidodinâmica de partículas e a esfericidade e chegaram à seguinte correlação entre a taxa de deformação e o módulo de velocidade relativa:

$$\gamma = 9 \cdot \frac{C_v}{\varepsilon \cdot (1 - C_v)^2} \cdot \frac{U}{d_p} \quad (3.29)$$

Laruccia, (1990) considerando partículas esféricas e não esféricas isoladas obteve a seguinte correlação:

$$\gamma = 0,39 \cdot (-8,85 \cdot \varepsilon^2 + 13,46 \cdot \varepsilon - 3,62) \cdot \frac{v_s}{d_p} \quad (3.30)$$

Almeida, (1995) considerou em seu estudo o deslocamento da partícula esférica ao longo do eixo principal do tubo, obtendo a seguinte correlação que contempla correção para efeito de fronteiras rígidas:

$$\gamma = 0,39 \cdot e^{6,81 \cdot \beta \cdot \frac{v_s}{d_p}} \quad (3.31)$$

Para  $\beta < 0,5$ .

### 3.5 Correlações de velocidade

Diversas são as correlações propostas para determinação da velocidade de sedimentação de partículas em fluidos. Nesta seção serão apresentadas as correlações de Moore e Chien (Bourgoyne, 2005).

#### 3.5.1 Correlação de Moore

A correlação para velocidade de sedimentação de uma partícula proposta por Moore (Bourgoyne, 2005) leva em consideração a viscosidade aparente do fluido  $\mu_a$ , conforme Equação 3.32.

$$\mu_a = \frac{K}{144} \left( \frac{d_2 - d_1}{v_a} \right)^{1+n} \left( \frac{2 + \frac{1}{n}}{0,0208} \right)^n \quad (3.32)$$

Onde:

$K$  e  $n$  - parâmetros reológicos para o modelo de potência;

$d_1$  e  $d_2$  - diâmetros interno e externo do espaço anular respectivamente e

$v_a$  - velocidade do fluido no espaço anular.

A Equação 3.33 apresenta a velocidade de sedimentação para números de Reynolds maior que 300. Para Reynolds menor ou igual a 3, a velocidade de sedimentação a ser usada é apresentada pela Equação 3.34. E por fim, para Reynolds entre 3 e 300, a velocidade de sedimentação é calculada pela Equação 3.35.

$$v_{sp} = 1,54 \sqrt{d_s \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}} \quad (3.33)$$

$$v_{sp} = 82,87 \frac{d_s^2}{\mu_a} (\rho_s - \rho_f) \quad (3.34)$$

$$v_{sp} = \frac{2,90 d_s (\rho_s - \rho_f)^{0,667}}{\rho_f^{0,333} \mu_a^{0,333}} \quad (3.35)$$

Onde:

$v_{sp}$  – velocidade de sedimentação de partículas;

$\rho_s$  – massa específica da partícula;

$\rho_f$  – massa específica do fluido.

### 3.5.2 Correlação de Chien

A correlação para a velocidade de sedimentação de uma partícula proposta por Chien (Bourgoyne, 2005) é muito semelhante à proposta por Moore, porém a viscosidade aparente é determinada pela Equação 3.36, usada para fluido do tipo polímeros:

$$\mu_a = \mu_p + 5 \frac{\tau_y d_s}{v_a} \quad (3.36)$$

Onde:

$\mu_a$  – viscosidade aparente;

$\mu_p$  – viscosidade plástica;

$\tau_y$  – tensão de cisalhamento;

$d_s$  - diâmetro da partícula e

$v_a$  - velocidade do fluido no espaço anular.

Quando o fluido usado for uma suspensão de bentonita em água, é recomendado usar a viscosidade aparente como sendo apenas a viscosidade plástica. A Equação 3.37 representa a velocidade de sedimentação:

$$v_{sp} = 0,0075 \left( \frac{\mu_a}{\rho_f d_s} \right) \left[ \sqrt{\frac{36800 d_s (\rho_s - \rho_f)}{\left( \frac{\mu_a}{\rho_f d_s} \right)^2 + 1}} - 1 \right] \quad (3.37)$$

Onde:

$v_{sp}$  – velocidade de sedimentação de partículas;

$\rho_f$  e  $\rho_s$  – massa específica do fluido e da partícula respectivamente.

### 3.6 Classificação dos fluidos de perfuração

A classificação dos fluidos utilizados na perfuração de poços de petróleo baseia-se no constituinte principal da fase contínua ou dispersante, podendo ser à base água, à base óleo ou à base ar, (THOMAS, 2001).

#### 3.6.1 Fluidos à base água

Nesta classe leva-se em consideração a natureza da água e os aditivos químicos empregados no preparo do fluido. As propriedades são afetadas pela proporção entre os componentes e as interações entre eles. A fase contínua é a água que é o principal componente, independente de ser doce, dura ou salgada.

A salinidade da água doce é inferior a 1000 ppm de NaCl equivalente, valor relativamente baixo, o que faz com que não exija pré-tratamento para utilização em fluidos de perfuração visto que não afeta o desempenho dos aditivos empregados no preparo do fluido. Com relação à água dura, existe a presença de sais de cálcio e magnésio dissolvidos em concentrações suficientes para afetar o desempenho dos aditivos químicos. E a água salgada, é constituída por uma concentração superior a 1000

ppm de NaCl equivalente e pode ser natural, como a água do mar, ou pode ser salgada por adição de sais como NaCl, KCl ou CaCl<sub>2</sub>.

A viscosidade, o limite de escoamento, as forças géis e o filtrado são controlados pelas argilas e polímeros, os quais dependem da água para prover um meio de dispersão, e consequentemente favorecerem uma boa taxa de remoção de sólidos e capacidade de estabilização das paredes do poço.

Os sólidos ativos dispersos no meio aquoso controlam a viscosidade do fluido, sendo os materiais argilosos mais usados a bentonita e a atapulgita. Já os sólidos inertes podem ser materiais industrializados, tais como a baritina, calcita e hematita, ou os próprios detritos finos das rochas perfuradas, composto por areia, silte ou calcáreo.

Dentre os produtos químicos adicionados ao fluido, destacam-se:

- Polímeros para redução de filtrado, viscosificar ou desflocular;
- Inibidores de formações ativas, como cloreto de sódio, cálcio e potássio;
- Dispersantes, como o lignossulfonato, tanino, lignito e fosfatos;
- Redutores de filtrado, como o amido;
- Surfactantes para reduzir a tensão superficial e emulsificar;
- Floculantes, como a soda cáustica, cloreto de sódio e cal;
- Alcalinizantes e controladores de pH, como cal hidratada, potassa cáustica e soda cáustica;
- Removedores de cálcio e magnésio, como carbonato e bicarbonato de sódio;
- Bactericidas, como paraformaldeído, compostos organoclorados, soda cáustica e cal.

Durante a perfuração das camadas rochosas superficiais utilizam-se fluidos não inibidos e devido essas rochas serem praticamente inertes pouco tratamento é feito no fluido. Já os fluidos inibidos, são utilizados para perfurar rochas que possuem elevada atividade na presença de água doce. Quando a rocha é ativa, ou seja, reage quimicamente com a água, tornando-se plástica, expansível, dispersível ou até mesmo solúvel, é necessária a adição de eletrólitos ou polímeros, os quais retardam esses efeitos.

No caso dos inibidores físicos, ocorre uma adsorção sobre a superfície dos materiais das rochas, impedindo o contato direto com a água. Os inibidores químicos reduzem a atividade química da água e reagem com a rocha, alterando a composição. Os mais usados são a cal, cloretos de sódio, de potássio e de cálcio.

Em situações especiais são utilizados o baixo teor de sólidos em fluidos à base água para aumentar a taxa de penetração da broca, reduzindo o custo da perfuração, e os fluidos emulsionados com óleo, com o objetivo de reduzir a densidade do sistema para evitar perda de circulação em zonas com baixa pressão de poros ou de fratura.

### **3.6.2 Fluidos à base óleo**

Neste tipo de fluido, a fase contínua ou dispersante é constituída por uma fase óleo, composta geralmente por hidrocarbonetos líquidos. A fase dispersa pode ser constituída por alguns sólidos coloidais. Uma emulsão água/óleo (teor de água < 10%) ou emulsão inversa (teor de água de 10 - 45%) podem ser usadas. Por possuírem maior custo e grau de poluição, são menos usados que os fluidos à base água, entretanto pesquisas têm aprimorado o desenvolvimento de óleos minerais e sintéticos, menos poluentes que o óleo diesel.

Dentre as principais características, destacam-se:

- Intervalo de variação de densidade amplo (0,89 a 2,4);
- Controle das propriedades mesmo a elevadas temperaturas (500°F);
- Baixa taxa de corrosão;
- Elevado grau de lubricidade;
- Baixa solubilidade de sais inorgânicos;
- Grau de inibição elevado com relação às rochas ativas;

Portanto, poços HPHT (alta pressão e alta temperatura); formações com baixa pressão de poros ou fratura; formação salina; poços direcionais ou de longo afastamento; formação de folhelhos argilosos ou plásticos e formação de arenitos produtores danificáveis por fluidos à base água são fortes candidatos ao uso de fluidos à base óleo.

Entretanto, existem algumas desvantagens frente aos fluidos à base óleo: dificuldade de detecção de gás no poço devido sua solubilidade na fase contínua; menores números de perfis que podem ser executados; menores taxas de penetração e dificuldade no combate a perda de circulação.

### **3.6.3 Fluidos à base ar**

Usados em zonas de elevada perda de circulação e formações com baixa pressão, formações muito duras (basalto ou diabásico), regiões com escassez de água ou glaciais com espessas camadas de gelo. A utilização de ar puro ou nitrogênio tem aplicação limitada à formações que produzam pouca água e não contenham hidrocarbonetos. Também se pode utilizar fluido aerado através de ar, nitrogênio ou gás natural no escoamento contínuo do fluido de perfuração, reduzindo a densidade do sistema.

Pode-se fazer uma perfuração com névoa, constituída de água dispersa no ar, em formações que produzam grande quantidade de água, o que poderia comprometer a perfuração com ar puro.

A utilização de espuma é viabilizada quando é necessária elevada eficiência no carregamento de sólidos. A dispersão de gás em líquido, onde um filme delgado de uma fase líquida, estabilizada por um tensoativo (a espuma) forma a fase contínua, promove um aumento da viscosidade, facilitando o carregamento.

### **3.7 Reologia**

A descrição da reologia pode ser feita como o estudo da deformação e escoamento da matéria. É a análise comportamental dos materiais frente à aplicação de uma força ou à deformação (SOLUTIONS, 1996). Devido ao fato de diferentes materiais apresentarem comportamento diferente quando submetidos às forças externas, faz-se necessário o estudo de suas propriedades reológicas para uma adequada classificação.

A reologia estuda o comportamento da deformação dos materiais ao longo do tempo quando são submetidos a tensões. Para a determinação das propriedades reológicas de um material, deve-se medir a deformação provocada por uma dada tensão ou medir a tensão requerida com a finalidade de se produzir certa deformação em um tempo determinado.

Existem dois desafios principais na reologia: o primeiro é o estabelecimento de uma relação quantitativa entre deformação e tensão ao longo do tempo para o material estudado. O segundo é o desenvolvimento de relações entre o comportamento reológico de um material e sua estrutura, composição e condições ambientais como a temperatura e a pressão (DEALY e WISSBRUM, 1990).

Quando a matéria está no estado sólido, diz-se que ocorre deformação, já quando no estado líquido, escoamento. Uma das diferenças entre sólidos e líquidos quando submetidos à tensão de cisalhamento é que em sólidos ela causa a deformação enquanto que em líquidos ela causa uma taxa de deformação, ou simplesmente, que os sólidos são elasticamente deformados, enquanto que os líquidos fluem (SCHRAMM, 2006).

Em materiais sólidos, a propriedade de maior interesse é a elasticidade e, em líquidos, a viscosidade. No entanto, quando os materiais não podem ser diferenciados em sólidos ou líquidos com clareza, a propriedade reológica de interesse nestes casos é a viscoelasticidade (PASQUEL, 1999).

Portanto, a reologia estuda parâmetros que provocam mudanças no escoamento e forma do material, tais como, a viscosidade, elasticidade, plasticidade e o escoamento da matéria.

### **3.7.1 Comportamento reológico**

O comportamento reológico dos materiais pode ser classificado através de dois extremos idealizados:

- Sólidos ideais (Lei de Hooke – hookeanos): Quando uma dada tensão aplicada corresponde a uma deformação, independente do tempo. Deformam-se elasticamente e a energia de deformação é totalmente recuperada quando termina o estado de tensão, com o corpo voltando à sua forma original
- Fluidos ideais (Lei de Newton – newtonianos): Para um fluido perfeitamente viscoso, não há recuperação de energia, sendo esta dissipada com a deformação permanente do material (STEFFE, 1996). Eles escoam, ou seja, deformam-se de forma irreversível e a energia de deformação é dissipada na forma de calor. Assim, em fluidos, a energia de deformação não é recuperada após a retirada da tensão (SCHRAMM, 2006).

Apenas alguns líquidos aproximam-se dos líquidos com comportamento ideal. O comportamento reológico da maioria dos líquidos os classifica entre os líquidos e os sólidos, sendo elásticos e viscosos, portanto chamados de viscoelásticos.



A elasticidade é a característica de materiais que retornam ao seu formato de origem assim que a carga é removida e cessam as tensões no material. A deformação é diretamente proporcional a tensão associada e independente da taxa de deformação. Em um material que apresenta comportamento puramente elástico, todo trabalho realizado para deformá-lo é armazenado como energia elástica, a qual será devolvida quando lhe for permitido retornar a sua forma original.

Para a viscosidade, diferentemente do que ocorre em sólidos elásticos, a tensão não se relaciona com a quantidade de deformação e sim com a taxa de deformação. (DEALY e WISSBRUM, 1990). A Figura 3 apresenta a classificação do comportamento reológico.

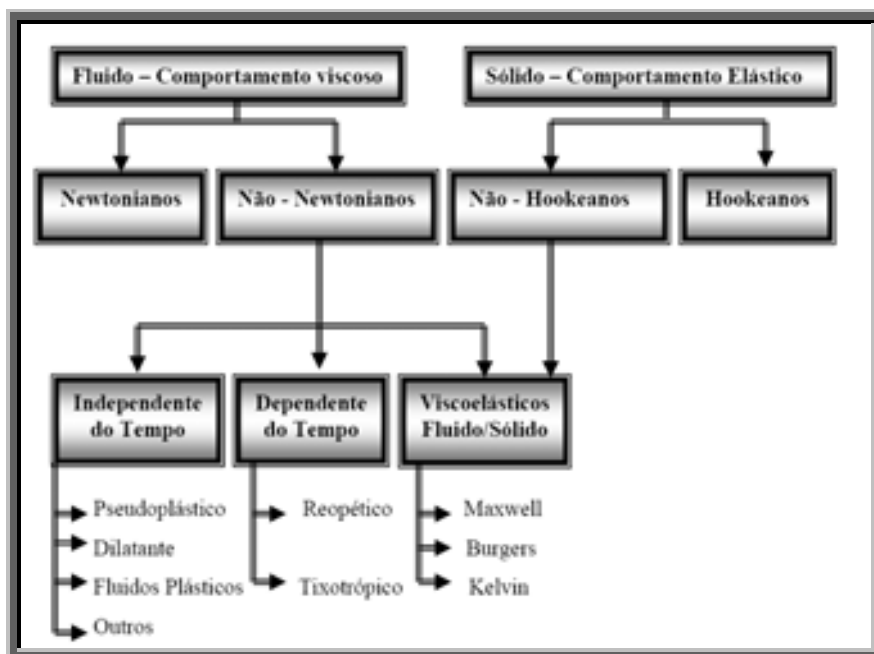


Figura 3 - Classificação do comportamento reológico

Fonte: (Raguzzoni, 2007)

O comportamento reológico dos fluidos divide-se em Newtonianos e não-Newtonianos. Os fluidos Newtonianos são caracterizados por uma relação linear entre tensão de cisalhamento e a taxa de deformação aplicada, dependendo da temperatura e da composição do fluido. Já os fluidos não-Newtonianos não possuem essa relação linear e podem ser dependentes ou independentes do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento (GOMES et al.; 2001).

### 3.7.1.1 Fluidos Newtonianos

A classificação dos fluidos em relação ao comportamento reológico envolve a determinação e análise da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para uma determinada condição de pressão e temperatura (STEFFE, 1996). Os fluidos Newtonianos ou líquidos ideais são aqueles que obedecem à lei de Newton, onde a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação e a viscosidade é constante, para certas condições de temperatura e pressão.

Mudanças ocorridas na taxa de cisalhamento não são capazes de afetar a viscosidade (SCHRAMM, 2006). A viscosidade não depende da taxa ou da quantidade de deformação, mas é uma constante de proporcionalidade entre tensão e a taxa de deformação, característica de cada material (DEALY e WISSBRUM, 1990). Como exemplo de fluidos Newtonianos é possível citar: água, óleo mineral, melão, entre outros (SCHRAMM, 2006).

### 3.7.1.2 Fluidos não-Newtonianos

Nesse tipo de fluido, a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação (PENNA, 1997). Em um gráfico de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação, eles não são lineares ou não passam pela origem (SCHRAMM, 2006). Podem ser dependentes e independentes do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento.

Além destes existem ainda os viscoelásticos, os quais apresentam tanto características de sólido como de líquido. O coeficiente de viscosidade para estes fluidos não ideais perde seu sentido, a menos que seja especificada a tensão de cisalhamento ou a taxa de deformação, por isto, nestes casos é denominada de viscosidade aparente ( $\eta$ ).

De acordo com Rao e Rizvi, 1986 a viscosidade aparente ( $\eta$ ) é a viscosidade dependente da taxa de deformação, como demonstra a Equação (3.38).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.38)$$

Onde:

$\eta$  - viscosidade aparente

$\gamma$  - taxa de deformação

$\tau$  - tensão de cisalhamento

A viscosidade aparente pode ser utilizada como parâmetro de comparação reológico entre diferentes comportamentos, separando-se em duas categorias: fluidos que precisam de uma tensão de cisalhamento inicial  $\tau_0$  para escoar e fluidos que não precisam da referida tensão. Os fluidos que não necessitam de  $\tau_0$  seguem a lei de potência, sendo definidos como pseudoplásticos ou dilatantes.

Fluidos não-Newtonianos que apresentam comportamento reológico independente do tempo, sob condições de temperatura e composição constantes, apresentam a viscosidade aparente dependente somente da taxa de deformação ou da tensão de cisalhamento. Já no caso dos fluidos cujo comportamento depende do tempo, a viscosidade aparente também depende da duração desta taxa de deformação (STEFFE, 1996).

#### **3.7.1.2.1 Fluidos pseudoplásticos**

Os fluidos pseudoplásticos, cujo comportamento é apresentado pela Figura 5, representam a maior parte dos fluidos que possuem comportamento não-Newtoniano. Seu comportamento reológico é independente do tempo e sua curva não é linear e passa pela origem. O aumento da taxa de deformação causa decréscimo da viscosidade aparente. Seu comportamento pode ser explicado através da modificação da estrutura de cadeias longas de moléculas com o aumento da taxa de deformação. Estas cadeias tendem a alinharem-se paralelamente às linhas de corrente, diminuindo a resistência ao escoamento.

#### **3.7.1.2.2 Fluidos dilatantes**

Apresentam comportamento reológico independente do tempo, sendo caracterizados por um aumento na viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação. Apresentam uma curva inversa à do fluido pseudoplástico, conforme mostrado na Figura 5. Em alguns casos é possível observar a presença de uma tensão inicial, a partir da qual o líquido começa a escoar (STEFFE, 1996). Suspensões

concentradas de partículas de PVC misturadas com líquidos plastificantes, dispersões de polímeros ou resina e algumas pastas de cimento são exemplos típicos.

### 3.7.1.2.3 Fluidos plásticos ou de Bingham

Os fluidos plásticos ou de Bingham são fluidos que escoam após vencerem a tensão de cisalhamento inicial  $\tau_0$ , resultando em um comportamento linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, conforme apresentado na Figura 4, (LEWIS, 1993).

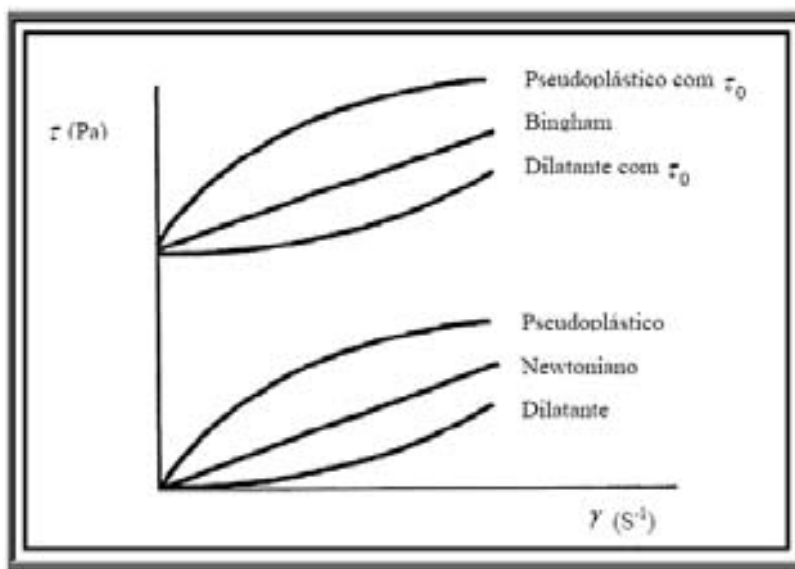


Figura 4 - Curvas de escoamento. Pseudoplástico, Bingham, Dilatante e Newtoniano.  
(Fonte: Gomes, 2001).

### 3.7.2 Modelos Reológicos

Os modelos reológicos são úteis para relacionar propriedades reológicas de um fluido com grandezas práticas, como concentração, temperatura, pH, entre outros. Esses modelos podem ser isotérmicos (descrevem o comportamento de um fluido a uma temperatura fixa) ou não isotérmicos (incluem relações como funções da temperatura). Dependendo do modelo utilizado, possuem ou não tensão inicial (VIDAL, 2000).

Alguns modelos não dependem de tensão inicial para escoar. Nesses modelos, o escoamento é iniciado imediatamente após a tensão ser aplicada. Dentre eles existem o

Modelo de Newton e o Modelo de Ostwald de Waale (Lei da Potência). Neste trabalho será tratado apenas este último visto que será o modelo utilizado no estudo de caso.

### 3.7.2.1 Modelo de Ostwald de Waale (Lei da Potência)

O modelo de Ostwald ou fluido de potência é definido pela Equação (3.39).

$$\tau = k \cdot \gamma^n \quad (3.39)$$

Onde:

$k$  - índice de consistência;

$n$  - índice de comportamento;

$\gamma$  - taxa de deformação;

$\tau$  - tensão de cisalhamento

O índice de consistência  $k$  indica o grau de resistência do fluido diante do escoamento, onde quanto maior mais consistente o fluido será. Já o índice de comportamento  $n$  indica o grau de afastamento do fluido Newtoniano, ou seja, quanto mais distante do valor unitário mais distante do comportamento Newtoniano.

A Figura 5 apresenta curvas de escoamento que seguem a lei de potência, cujos fluidos I, II, e III são denominados pseudoplásticos quando  $0 < n < 1$  e para os fluidos a, b, e c, denominados dilatantes quando  $n > 1$ . Quando  $n = 1$  o fluido será Newtoniano.

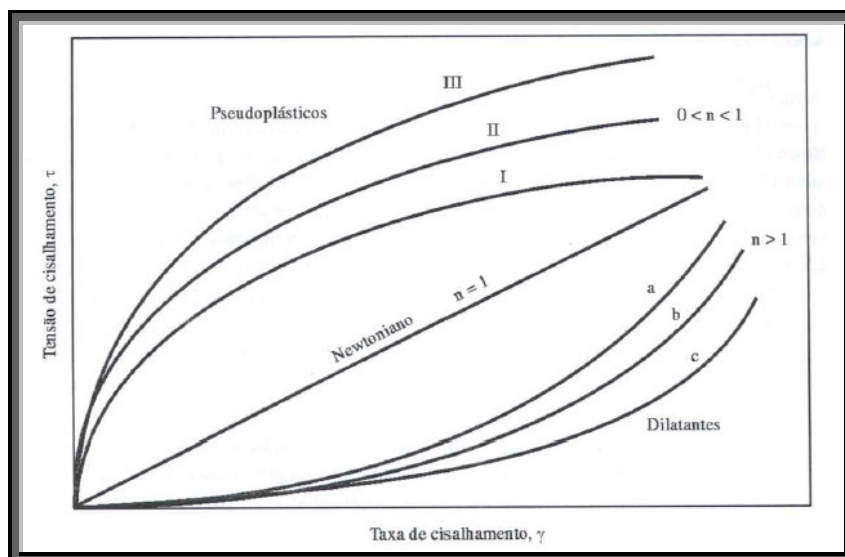


Figura 5 - Curvas de escoamento como função do índice de comportamento –  $n$ .

Fonte: Machado, 2002

A variação da viscosidade aparente com a taxa de deformação é representada por:

$$\eta = k.\dot{\gamma}^{n-1} \quad (3.40)$$

Existem modelos que dependem da tensão inicial para escoar. São representativos para fluidos que só iniciam o escoamento quando a tensão de cisalhamento aplicada supera uma tensão inicial, que é característica de cada fluido (VIDAL, 2000). Dentre os mais usuais destacam-se o Modelo de Bingham; Modelo de Herschel-Bulkley; Modelo de Casson e Modelo de Robertson-Stiff.

### 3.7.3 Viscosimetria

A viscosimetria é considerada um segmento da mecânica dos fluidos que consiste na prática experimental de medir a resposta reológica de fluidos considerados puramente viscosos, onde a componente elástica possa ser desprezada. A medida de certas grandezas físicas, tais como velocidade angular, torque, ângulo de deflexão, tempo, etc., são transformadas em tensão de cisalhamento e taxa de deformação, as quais por sua vez permitem uma correlação com viscosidade. O estudo é efetuado considerando-se certo modelo para determinação da viscosidade ou de parâmetros viscosos ou por meio da construção e interpretação de curvas de escoamento e de viscosidade, (MACHADO, 2002).

Os viscosímetros são capazes de medir apenas parâmetros viscosos do fluido sob cisalhamento contínuo. Seu projeto é fundamentado em princípios de escoamento permanente laminar através de geometrias definidas. O escoamento pode ser em torno de uma esfera; entre placas planas paralelas; entre cilindros coaxiais; através de tubo de seção circular; entre cone e placa circular e entre placas circulares.

A seleção do modelo do viscosímetro deve levar em consideração uma série de fatores, tais como a aplicação dos dados (se serão usados para especificação de produtos, controle de processos, pesquisa, etc.); tipo de fluido a ser testado (corrosivo, volátil, instável, etc.); comportamento reológico (Newtoniano ou não-Newtoniano); variáveis a serem controladas (tensão cisalhante, taxa de cisalhamento, viscosidade, temperatura e pressão) e o custo/benefício.

### 3.7.4 Reometria

O comportamento viscoelástico demandou o desenvolvimento de modelos mais específicos para caracterizar esses materiais que possuem um comportamento híbrido. Muitos fluidos empregados na indústria do petróleo, tais como fluidos de perfuração e de fraturamento, apresentam componentes elásticos significativos. Um dos segmentos que mais tem estudado esses efeitos elásticos dos fluidos é o da perfuração e completação de poços de alta inclinação e afastamento, técnica amplamente empregada na exploração em águas profundas.

Diversos fluidos de perfuração possuem aditivos que lhes conferem esse caráter elástico. Dispersões argilosas e poliméricas e misturas de derivados de petróleo contendo hidrocarbonetos de elevado peso molecular apresentam caráter viscoelástico. Um estiramento das moléculas pode ser verificado quando aplicada uma deformação, causando mudança nos ângulos entre as ligações na cadeia principal, aumentando o estado energético das moléculas. Quando a força é retirada, as moléculas relaxam e retornam a sua conformação inicial em um menor estado de energia.

Para a determinação dos parâmetros reológicos para os modelos viscoelásticos, convém à aplicação de tensões oscilatórias ao invés de constantes, que conduzem a um estado permanente de cisalhamento como ocorre nos viscosímetros.

A investigação do comportamento reológico sob condição de escoamento pleno ou o comportamento viscoelástico de certo fluido é possível através do uso de reômetros. O princípio do projeto é basicamente o mesmo dos viscosímetros, porém implementos mecânicos permitem o movimento oscilatório e o controle da tensão ou da taxa de cisalhamento.

Informações sobre viscosidade e elasticidade em função do tempo de resposta são obtidas pelos reômetros, os quais relacionam a velocidade angular ou frequência com a tensão oscilatória resultante. Os testes são realizados em um vasto intervalo de velocidades ou frequência, evitando a perturbação mecânica das amostras e o rompimento das estruturas internas.

Os testes dinâmicos com reômetro rotativo implicam que, a parte giratória do sensor, placa, cilindro ou cône, não gira continuamente em uma direção, mas movimenta-se alternativamente, descrevendo uma função senoidal com o tempo, alcançando pequenos ângulos de deflexão para esquerda e para direita. Os sistemas

capilares e rotacionais são os mais comuns, sendo este último o mais testado através de pesquisas. (STEFFE, 1996).

- Reômetro rotacional de cilindros concêntricos;
- Reômetro rotacional de placas paralelas;
- Reômetro rotacional de cone e placa

Os reômetros rotacionais permitem o uso de pequenas quantidades da amostra e podem fornecer uma medida contínua da relação da taxa de deformação e tensão de cisalhamento.

#### 3.7.4.1 Reômetro rotacional de cilindros concêntricos

Nos reômetros de cilindros concêntricos, conforme mostrado na Figura 6 tem-se o sistema Searle, no qual o cilindro interno gira, além de ser utilizado para a medida do torque e o sistema Couette, onde o corpo externo gira e o torque é medido no cilindro interno (STEFFE, 1996). É utilizado para análise de materiais com baixa viscosidade contendo partículas.

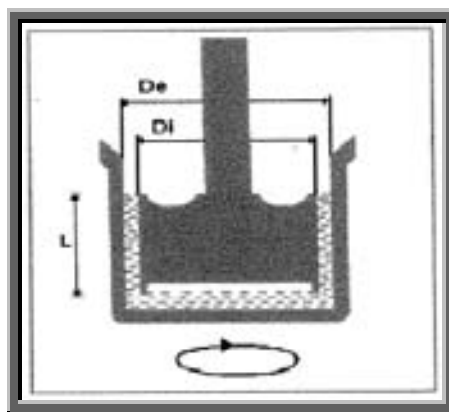


Figura 6 - Geometria de cilindros concêntricos

Fonte: Gozzo, 2003.

#### 3.7.4.2 Reômetro rotacional de placas paralelas

O reômetro de placas paralelas é constituído por duas placas formando um disco e apresentando uma distância “*gap*” uma da outra, conforme mostra a Figura 7. Esta



distância entre as placas pode ser variada, obtendo-se, assim, diferentes faixas de taxa de deformação. Qualquer uma das partes pode girar para medir o torque necessário. Utilizado em materiais não-homogêneos, contendo fibras e partículas. Geralmente este sistema é usado em medidas dinâmicas (oscilação).

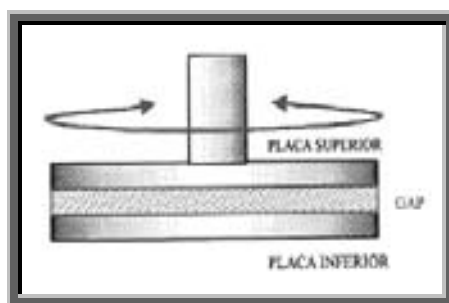


Figura 7 - Geometria de placas paralelas.

Fonte: Gozzo, 2003.

#### 3.7.4.3 Reômetro rotacional de cone e placa

O reômetro de cone e placa consiste em uma placa horizontal e um cone invertido que apresenta o vértice muito próximo ao prato (Figura 8). O ângulo formado entre a superfície do cone e o prato é bastante pequeno e a amostra do fluido localiza-se neste pequeno espaço. Como no reômetro de placas paralelas, qualquer uma das partes pode girar para medir o torque necessário. Aplicado em materiais com alta viscosidade sem partículas. Este sistema é indicado para a aplicação de altas taxas de cisalhamento.

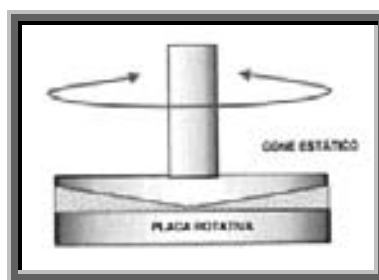


Figura 8 - Geometria de cone e placa.

Fonte: Gozzo, 2003.

### 3.8 Influência da Temperatura no comportamento reológico de fluidos.

Aranha et al., (2008) desenvolveram correlações que ajustam o comportamento reológico de fluidos como função da temperatura. Além da temperatura, outros parâmetros importantes investigados foram peso específico e razão água / óleo (para fluidos de base oleosa). Eles concluíram que a metodologia proposta com base em correlações ajustadas para os fluidos, consegue satisfatoriamente obter valores de leituras reológicas corrigidas para determinada temperatura sendo assim possível determinar os parâmetros reológicos ao longo do poço em função da temperatura e aplicá-los em equações de cálculo de perda de carga.

Os resultados servirão para alimentar modelos de correção de viscosidade com temperatura a serem implementados na nova versão do SIMCARR – Simulador de Hidráulica de Perfuração e Carreamento de Cascalhos e no software PWDa, interpretador de dados de pressão de fundo em tempo real durante a perfuração.

### 3.9 Coeficiente de atrito ou resistência

Conforme apresentado no capítulo 2, a força resistiva pode ser expressa em função do coeficiente de resistência, que depende do tamanho, geometria, rugosidade e regime de queda da partícula.

O coeficiente de resistência foi estudado por Dedegil, (1987) que desenvolveu uma correlação que se ajusta a qualquer modelo reológico, inclusive o modelo Newtoniano, considerando vários intervalos de  $Re^*$ .

$$C_D = \frac{24}{Re^*} , \text{ para } Re^* < 8 \quad (3.41)$$

$$C_D = \frac{22}{Re^*} + 0,25 , \text{ para } 8 < Re^* < 150 \quad (3.42)$$

$$C_D = 0,4 , \text{ para } Re^* > 150 \quad (3.43)$$

Redefinindo o  $C_D$  e o número de Reynolds para:

$$C_D = \frac{2}{v_\infty^2 \rho_f} \left[ \frac{2}{3} (\rho_p - \rho_f) d_p g - \pi \tau_o \right] \quad (3.44)$$

$$Re^* = \frac{v_\infty^2 \rho_f}{\tau} \quad (3.45)$$

Onde:

$$\tau = \tau(\gamma) \quad (3.46)$$

e

$$\gamma = \frac{v_\infty}{d_p} \quad (3.47)$$

As Tabelas 1 e 2 apresentam outras correlações para o coeficiente de resistência para fluidos Newtonianos e não Newtonianos.

Tabela 1- Correlações para determinação do coeficiente de resistência das partículas para fluidos Newtonianos.

Autor	$C_D$	Re
Heider e Levenspiel (1989)	$C_D = \frac{24}{Re} \left( 1 + 0,186 \cdot Re^{0,6459} \right) + \frac{0,4251}{1 + 6880,95/Re}$	$Re < 2,6 \cdot 10^5$
Felice (1999)	$C_D = \left( 0,63 + \frac{4,8}{Re^{0,5}} \right)^2$	-
Cheremisinoff e Gupta (1983)	$C_D = \frac{24}{Re}$	$Re < 3$
	$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/3}}$	$3 < Re < 500$
	$C_D = 0,44$	$Re > 500$
Doron et al (1987)	$C_D = 18,5 Re^{-0,6}$	$0,1 < Re < 500$
	$C_D = 0,44$	$500 < Re < 2 \cdot 10^5$
Stuckenbruck (2005)	$C_D = \frac{24}{Re} \left( 1 + \frac{3}{16} Re^{2/3} \right)$	$Re < 1200$
	$C_D = 0,44$	$Re > 1200$

Fonte: PUC-Rio Certificação Digital 0115570/CA

Tabela 2 - Correlações para determinação do coeficiente de resistência das partículas para fluidos não-Newtonianos (Modelo de Potência).

Autor	$C_D$	Obs	Re
Chhabra e Peri (1991)	$C_D = \frac{Re^{2-n}}{A_r}$ $A_r = \frac{4g\Delta\rho d_p^{2-n}}{3K^{2-n}\rho_f^{2-n}}$ $Re = a d_p^b$ $a = \exp\left(\frac{0,51}{n} - 0,73n\right)$ $b = \frac{0,954}{n} - 0,16$	$Re < 10^4$  $\Delta\rho = \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_f}$	$Re = \frac{\rho_f v_t^{2-n} d_p}{K}$
Dean et al. (2000)	$C_D = \frac{24(1 + 0,15Re^{0,687})}{Re}$	Re < 989	$Re = \frac{\rho_f v_t^{2-n} d_p}{8^{n-1} K}$
	$C_D = 0,44$	Re > 989	
Machao et al. (1995)	$C_D = 2,25Re^{-0,31} + 0,36Re^4$	Re < 1000	$Re = \frac{\rho_f v_t^{2-n} d_p}{K}$
Mura et al. (2001)	$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re} + 0,4}$	Re < 10 <sup>5</sup>	$Re = \frac{\rho_f v_t^{2-n} d_p}{K}$
Ceyland et al. (1999)	$C_D = \frac{24}{Re} X_n^*$		$Re = \frac{\rho_f v_t^{2-n} d_p}{K}$
	$X_n^* = X_n = 3^{2n-1} \frac{n^2 - n + 3}{n^{3n}}$	Re < 10 <sup>4</sup>	
	$X_n^* = X_n + \frac{1+n^2}{3n+1} \log(10^3 Re)$	10 <sup>4</sup> < Re < 10 <sup>5</sup>	
	$X_n^* = X_n + \frac{4n^2}{24Re^{n-1/2}}$	10 <sup>5</sup> < Re < 10 <sup>6</sup>	

Fonte: PUC-Rio Certificação Digital 0115570/CA

---

## Capítulo 4

### Estudo Experimental

---

## 4.1 Materiais e métodos

O objetivo deste capítulo é a caracterização reológica dos fluidos para avaliar o modelo reológico e o comportamento da viscosidade com o tempo, além da realização dos ensaios experimentais de sedimentação para validação das equações que serão utilizadas para velocidade de sedimentação de partículas.

### 4.1.1 Fluidos utilizados

Os fluidos utilizados nesse experimento foram: Fluido A (emulsão inversa), Fluido B (à base de goma xantana), e Fluido C (à base de carbopol).

### 4.1.2 Ensaios reológicos FANN 35 A

A determinação dos parâmetros reológicos e do modelo reológico dos fluidos em estudo foi feita através de uma análise em um viscosímetro Fann, modelo 35 A, conforme a Figura 9.



Figura 9 - Viscosímetro Fann, modelo 35 A

O procedimento para utilização do viscosímetro Fann foi conforme descrito abaixo:

- Agitar o fluido a ser testado no misturador durante 5 minutos em velocidade alta;
- Colocar o fluido no copo do viscosímetro até a sua marca e este na base do equipamento. Elevar o copo até que o nível do fluido coincida com a marca no rotor e fixá-lo com o parafuso;
- Fazer as leituras no viscosímetro nas rotações de 600; 300; 200; 100; 6 e 3 rpm.

Para determinação da taxa de deformação deve-se converter as velocidades rotacionais do viscosímetro, expressas em rpm, para taxa de deformação, expressa em  $s^{-1}$ , de acordo com a Equação (4.1). Essa conversão depende da combinação *rotor - bob*. Nesse caso foi utilizado o conjunto R1-B1, cuja taxa de deformação nominal em 1 rpm TXD(1) é igual a 1,7034.

$$\gamma = \text{TXD} (1) \times (\text{rpm}) \quad (4.1)$$

Onde:

$\gamma$  - taxa de deformação obtida da conversão de dada rpm do viscosímetro, expressa em  $s^{-1}$ ;

TXD (1) - taxa de deformação nominal de 1 rpm do viscosímetro para uma dada combinação *rotor - bob*;

RPM: Número de rotações por minuto.

Para determinação da tensão de cisalhamento  $\tau$  deve-se converter as leituras de deformação da mola para tensões de cisalhamento, através da Equação (4.2).

$$\tau = C \times f \times L \quad (4.2)$$

Onde:

$\tau$  - tensão de cisalhamento para uma dada rpm, expresso em lbf /100  $pe^2$  ou em Pascal;

C - Fator de conversão da tensão de cisalhamento para um dado *bob* – Neste caso, B1,

$C = 1,068$  ( lbf / 100  $pe^2$  ) ou  $C = 0,511$  (Pascal);

f - fator de mola de acordo com o fabricante (neste caso = 0,998);

L - leitura da deformação da mola obtida para dada rpm do viscosímetro.



Para cada rotação, faz-se a leitura  $L$  e obtém-se o respectivo  $\tau$ . De posse dos dados de tensão de cisalhamento e taxa de deformação é possível verificar qual o modelo reológico melhor representa o comportamento do fluido.

Com o SIMCARR - Simulador de Hidráulica de Perfuração e Carreamento de Cascalhos, é possível realizar a determinação da taxa de deformação e da tensão de cisalhamento automaticamente, fornecendo como dados de entrada a leitura da deformação da mola obtida para dada rpm e a respectiva rpm, obtidas no viscosímetro Fann.

#### 4.1.3 Ensaios reológicos no reômetro ARES

A determinação dos parâmetros reológicos relativos ao comportamento da viscosidade como função do tempo para os fluidos em estudo foi feita através de uma análise da variação da tensão de cisalhamento em função do tempo para uma taxa de deformação fixa, pequena o suficiente para não interferir na formação do gel.

Os ensaios reológicos em estado estacionário foram realizados em reômetro de taxa controlada, da marca Rheometric Scientific<sup>TM</sup>, modelo ARES, conforme Figura 10.



Figura 10 - Reômetro - modelo ARES

As análises foram realizadas na temperatura de 25°C, mantida através do banho termostático, marca Thermo Electron Corporation, modelo NESLAB RTE 17, conforme Figura 11.



Figura 11 - Banho termostático - NESLAB RTE 17

A geometria utilizada foi a *Grooved Couette*, com ranhuras para reduzir o possível escorregamento entre a amostra e às paredes da referida geometria durante a medida, sem afetar significativamente a cinemática do escoamento (Figura 12). As dimensões desta geometria foram: diâmetro do bob: 32 mm e diâmetro do copo: 34 mm.

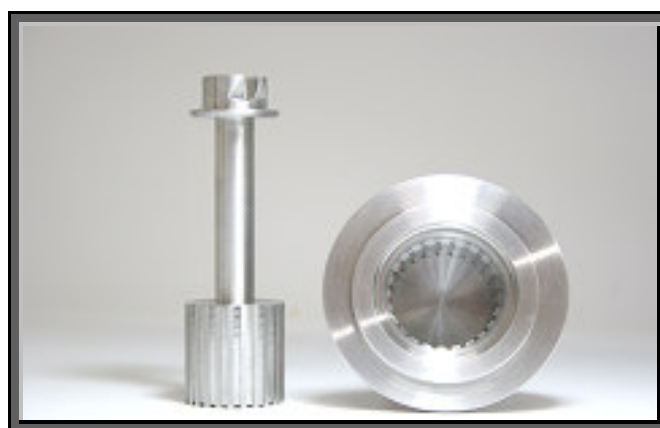


Figura 12 - Geometria *Grooved Couette*

A seguinte seqüência operacional foi utilizada:

- Aumentou-se gradativamente a taxa de deformação de 0 a  $100 \text{ s}^{-1}$  durante 5 s;
- Manteve-se a taxa constante de  $100 \text{ s}^{-1}$  durante 5 minutos (para promover a agitação da amostra);
- Reduziu-se a taxa de  $100 \text{ s}^{-1}$  para  $0,001 \text{ s}^{-1}$  durante 5s;
- Manteve-se a taxa de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  durante 120 minutos (para permitir o crescimento do gel sem quebrá-lo);

#### 4.1.4 Ensaios de sedimentação

Com o objetivo de avaliar a consistência das equações teóricas propostas para o modelo, foram realizados ensaios de sedimentação de esferas nos fluidos B e C. Devido a indisponibilidade de amostra, este ensaio não foi possível para o fluido A. O procedimento se baseia na medida do tempo que a esfera leva para atravessar um determinado comprimento da proveta, o que permite a determinação da velocidade terminal da esfera.

O procedimento foi realizado utilizando-se uma proveta de 2L, com comprimento de 50,0 cm e diâmetro de 8,1cm, grande o suficiente para reduzir os efeitos de fronteiras rígidas durante o deslocamento da esfera. As esferas, cujas dimensões são dadas na Tabela 3, foram medidas com paquímetro digital da MITUTUYO Corporation (0,01 - 200 mm). A Figura 13 apresenta as esferas utilizadas.

Tabela 3 - Dados das esferas utilizadas

<b>Esfera</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Diâmetro (mm)</b>	3,95	6,33	7,92	10,49	17,45
<b>Massa (g)</b>	0,25	1,04	2,04	4,72	21,71
<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	0,032	0,132	0,260	0,604	2,782
<b><math>\rho_s</math> (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	7747,30	7831,12	7842,53	7809,39	7803,25

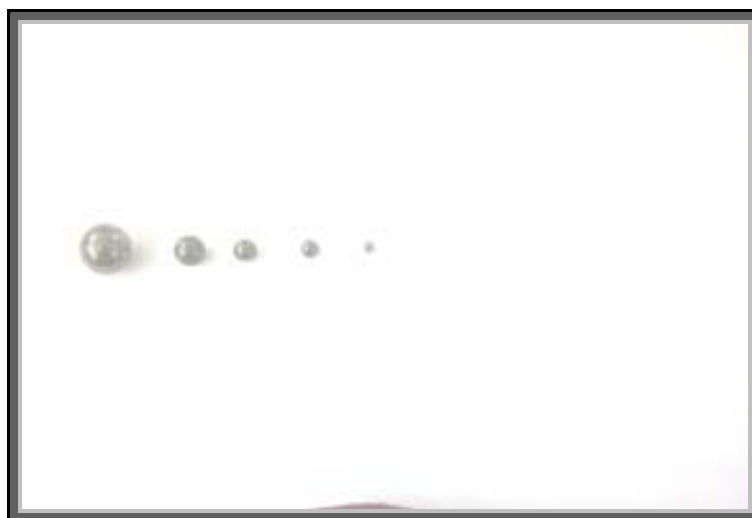


Figura 13- Esferas utilizadas

Foram testadas esferas de material plástico, porém devido à reduzida massa específica apresentaram velocidade relativa ao fluido nula. Portanto os experimentos realizados somente com as esferas de aço. Para reduzir interferência externa no lançamento das esferas, foram utilizados centralizadores nas tampas das provetas, conforme Figura 14, para garantir que as esferas iniciariam a descida a partir de uma posição estática e na parte central da proveta, longe das paredes. As esferas foram lançadas, uma a uma, em cada fluido e foram medidos os tempos e as respectivas distâncias percorridas para se obter a velocidade média terminal.



Figura 14 - Centralizador para lançamento de esferas

#### 4.1.5 Procedimento iterativo

A determinação da viscosidade em função da taxa de deformação e do tempo é baseada no seguinte procedimento iterativo:

**No instante  $t_0$ :**

1. A partir das análises reológicas da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação, determinam-se o modelo e seus parâmetros reológicos.
2. Através de uma correlação de viscosidade com a taxa de deformação, estima-se a taxa e determina-se a viscosidade;  $\eta = f(\gamma)$
3. A partir de uma correlação de velocidade com a viscosidade determina-se a velocidade;  $v_p = f(\eta)$
4. Através de uma correlação de taxa de deformação com a velocidade determina-se a nova taxa de deformação;  $\gamma = f(v_p)$
5. Compara-se a taxa inicialmente estimada com a determinada no item 4 e caso diferente substituir a nova taxa no item 2 e repetir o ciclo. O processo é iterativo até convergência da taxa de deformação, viscosidade e velocidade.

#### **Evolução no tempo**

Quando ocorre a parada no bombeio, o fluido inicia o processo de gelificação e os parâmetros reológicos são modificados. Para determiná-los, deve-se realizar ensaios reológicos de tensão em função do tempo utilizando-se uma taxa de deformação fixa, pequena o suficiente para não interferir na formação do gel. Essa tensão pode ser convertida em viscosidade e avaliar sua evolução em função do tempo.

$$\eta = f(t) \text{ para } \gamma \text{ constante.}$$

A determinação dos parâmetros reológicos será função da nova viscosidade e o processo iterativo é retomado a partir do item 2 para convergência da nova taxa de deformação, viscosidade e velocidade.

Obtida a viscosidade para o novo tempo  $i$ , determina-se a velocidade em função da viscosidade  $v_p = f(\eta)$  e o deslocamento a partir da correlação de velocidade  $\Delta s = v_p \cdot \Delta t$ , onde:  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ .

O fluxograma do procedimento iterativo é apresentado na Figura 15.

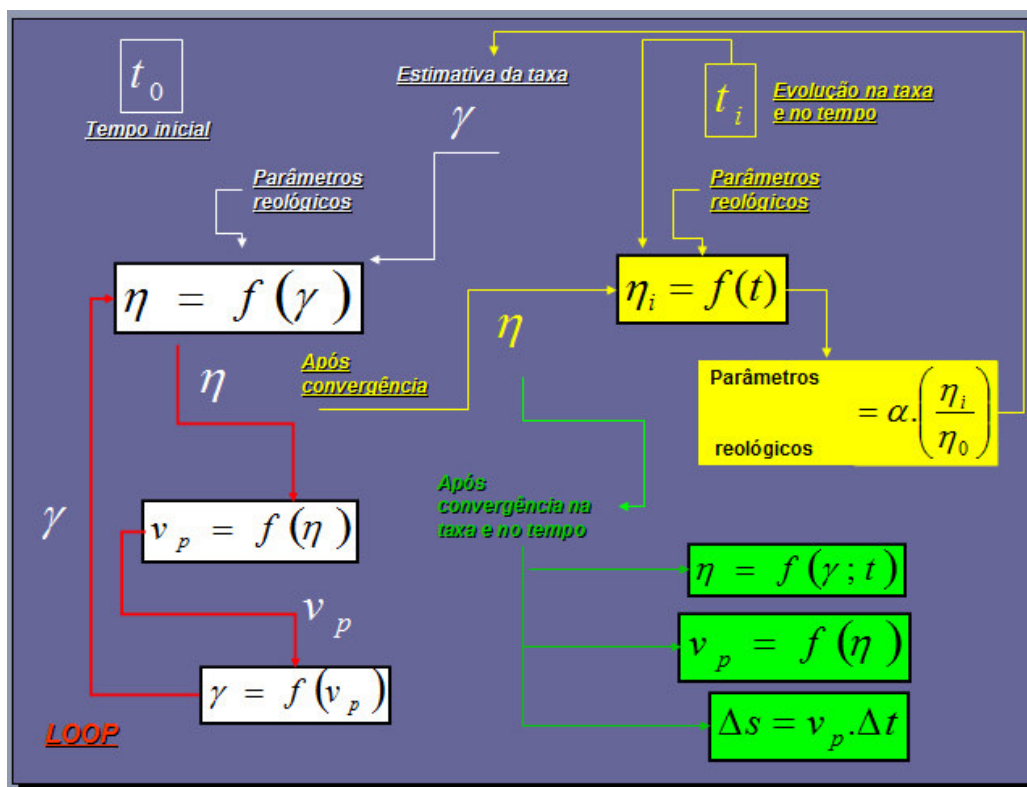


Figura 15 - Fluxograma para determinação do deslocamento das partículas dentro do poço.

---

## Capítulo 5

### Resultados e discussão

---

## 5.1 Sedimentação de esferas

Devido ao pequeno comprimento da proveta (com relação ao comprimento de um poço de petróleo) e à elevada massa específica da partícula (com relação à massa específica de cascalhos), o que afeta diretamente à velocidade relativa da partícula, as esferas percorreram toda extensão da proveta antes do processo de gelificação do fluido, ou seja, com viscosidade constante e consequentemente velocidade constante.

### ➤ Fluido B (à base de goma xantana)

Para o fluido B, utilizaram-se as esferas 1, 2, 3, 4 e 5, entretanto, à medida que a massa específica das esferas aumenta, a velocidade de sedimentação também aumenta, reduzindo a precisão na medida do tempo (centésimos de segundo). Portanto, os resultados foram validados para as esferas 1, 2, 3 e 4.

A partir de uma correlação de velocidade com a viscosidade determinou-se a velocidade de sedimentação conforme descrito no capítulo 2 (Equação (2.15)), ponderada com o efeito de fronteiras rígidas (Equação (3.7)), resultando na Equação (5.1). Não foram considerados os efeitos de concentração de partículas nem de forma devido o experimento ter sido realizado com uma única partícula e a mesma ser uma esfera.

$$v_p = \frac{0,545 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d_p^2 \cdot (k_\beta)}{\eta} \quad (5.1)$$

Para avaliar a consistência de equações propostas por outros autores, também foi analisada a Equação 3.37 proposta por Chien (Bourgoyne, 2005). O resultado comparativo entre as velocidades experimentais e as velocidades teóricas calculadas a partir da Equação 5.1 e 3.37 com as esferas 1, 2, 3 e 4 é mostrado na Figura 16.



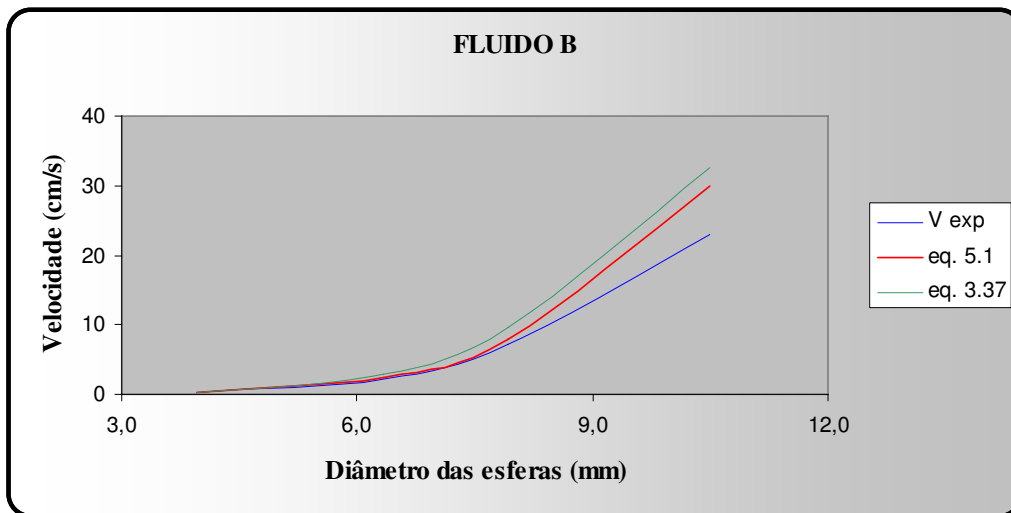


Figura 16 - Resultado comparativo entre as velocidades experimentais e as velocidades teóricas para o fluido B com relação ao diâmetro das esferas.

Verifica-se que o resultado obtido utilizando-se as equações 3.37 e 5.1 é bem próximo ao obtido experimentalmente, especialmente para o caso das esferas de menor diâmetro. Um fator limitante para realização dos ensaios experimentais com o fluido B é a dificuldade de visualização do movimento da esfera ao longo da proveta devido o fluido não ser translúcido. Neste caso, a verificação para medida do tempo foi feita na parte inferior da proveta, quando a esfera alcançava a mesma. Apesar de existirem metodologias que utilizam sensores para monitoramento da movimentação de partículas, neste estudo não foi possível devido indisponibilidade do mesmo. Para superar essa dificuldade, foi utilizado o fluido C que é translúcido, permitindo a visualização de todo o trajeto das esferas dentro das provetas.

➤ Fluido C (à base de carbopol)

Para o fluido C, a visualização de toda a trajetória da esfera ao longo da proveta foi bem acompanhada devido esse fluido ser translúcido, permitindo a divisão do comprimento da proveta em seções, que por sua vez possibilitou a avaliação da velocidade em vários trechos, comprovando que a velocidade terminal (constante) havia sido atingida logo após o início do lançamento da esfera.

O experimento de sedimentação foi realizado com as esferas 1, 2, 3, 4 e 5. Devido à esfera 1 possuir massa específica muito pequena, ela ficou estática na

superfície do fluido, apresentando velocidade relativa nula. Já com relação à esfera 5, devido sua elevada massa específica, apresentou uma rápida velocidade de sedimentação, gerando imprecisão na medida do tempo. Portanto, a validação foi feita para as esferas 2, 3 e 4.

O resultado comparativo entre as velocidades experimentais e as velocidades teóricas calculadas pelas Equações 3.37 e 5.1 para as esferas 2, 3 e 4 é mostrado na Figura 17.

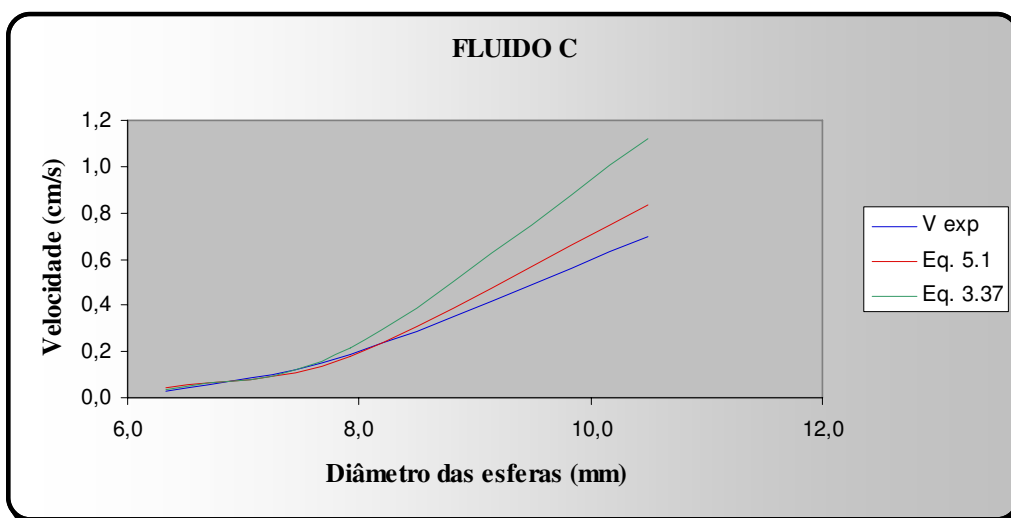


Figura 17 - Resultado comparativo entre as velocidades experimentais e as velocidades teóricas para o fluido C com relação ao diâmetro das esferas.

Através da comparação entre os dados experimentais e teóricos, verificou-se que as correlações propostas para representar o comportamento da velocidade de sedimentação de partículas apresentam boa reprodutibilidade, especialmente para as esferas de menor diâmetro, o que permite utilizá-las no estudo de caso.

Para determinação da velocidade teórica também se levou em consideração o efeito de fronteiras rígidas, conforme Equação (5.1). Não foram considerados os efeitos de concentração de partículas nem de forma devido o experimento ter sido realizado com uma única partícula e a mesma ser uma esfera.

## 5.2 Determinação do modelo reológico para os fluidos utilizados.

Os parâmetros reológicos obtidos na análise do viscosímetro Fann foram utilizados no SIMCARR - Simulador de Hidráulica de Perfuração e Carreamento de Cascalhos, da Petrobras, para determinação do modelo reológico mais representativo de cada fluido. A Figura 18 apresenta como exemplo, a alimentação dos dados de entrada referentes às leituras do viscosímetro. Primeiramente escolhe-se o modelo (Newtoniano ou não-Newtoniano); preenchem-se as leituras obtidas no viscosímetro para cada rotação e os parâmetros reológicos são gerados para cada modelo reológico.

The screenshot shows the 'Modelo' (Model) selection screen in the SIMCARR software. It features two radio buttons: 'Newtoniano' (Newtonian) and 'Não Newtoniano' (Non-Newtonian), with the latter selected. Below this is a dropdown menu for 'Modelo Reológico' (Rheological Model), currently set to 'Power Law'. A dropdown menu is open, showing options: 'Power Law', 'Bingham Plastic', 'Herschel-Bulkley', and 'Robertson e Stiff'. The 'Leituras do Reômetro' (Rheometer Readings) section contains two columns of input fields. The left column has values: 600 (69.0), 300 (45.0), 200 (34.0), 100 (23.0), 6 (11.0), and 3 (10.0). The right column has empty fields for 300, 200, 100, 6, and 3. Each column has a 'Parâmetros...' (Parameters...) button at the bottom.

Figura 18 - Dados de entrada para o SIMCARR

Os parâmetros reológicos calculados são apresentados em uma tela conforme Figura 19. Nela são apresentadas: a rotação (N), o ângulo de deflexão (T), a taxa de deformação (SRb), as tensões cisalhantes (SSb lido) para cada uma das leituras do reômetro, a tensão cisalhante prevista pelo modelo reológico escolhido, neste caso, Power Law (SSb Calc) e o desvio padrão (SD) para a correlação proposta.

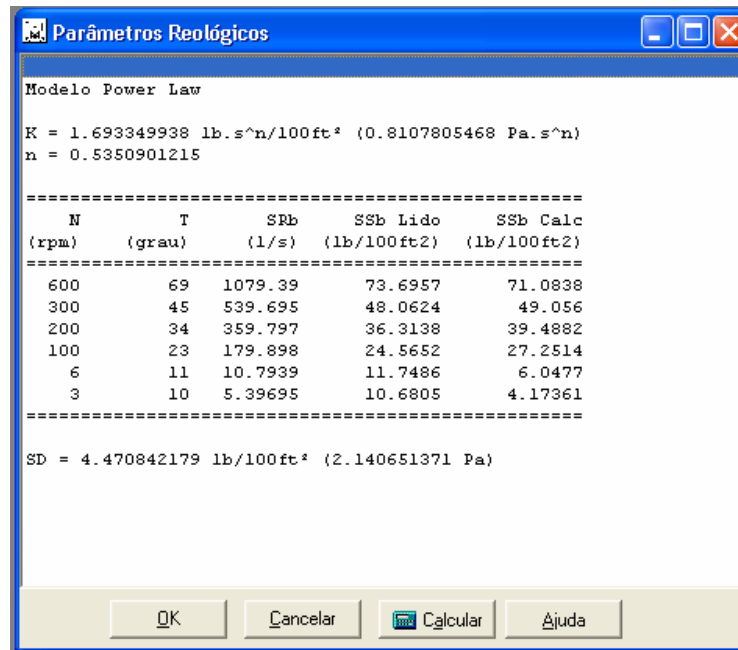


Figura 19 - Resultados gerados pelo SIMCARR

Através de uma avaliação do desvio padrão relativo, determina-se o modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais.

A Figura 20 apresenta o comportamento da tensão em função da taxa de cisalhamento para o fluido A.

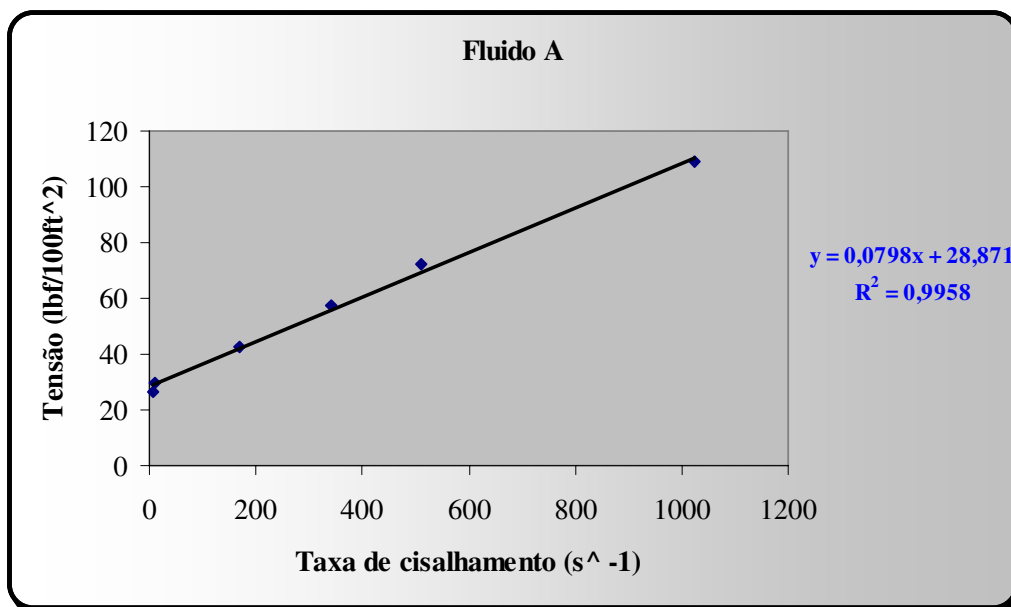


Figura 20-Comportamento da tensão em função da taxa de cisalhamento para o fluido A.

A equação e a correlação são obtidas automaticamente ao traçar a linha de tendência (recurso computacional). O comportamento do fluido A é representativo do modelo de Bingham, ou seja, comportamento linear da tensão em função da taxa de cisalhamento apresentando limite de escoamento.

A Figura 21 apresenta o comportamento da tensão em função da taxa de cisalhamento para o fluido B.

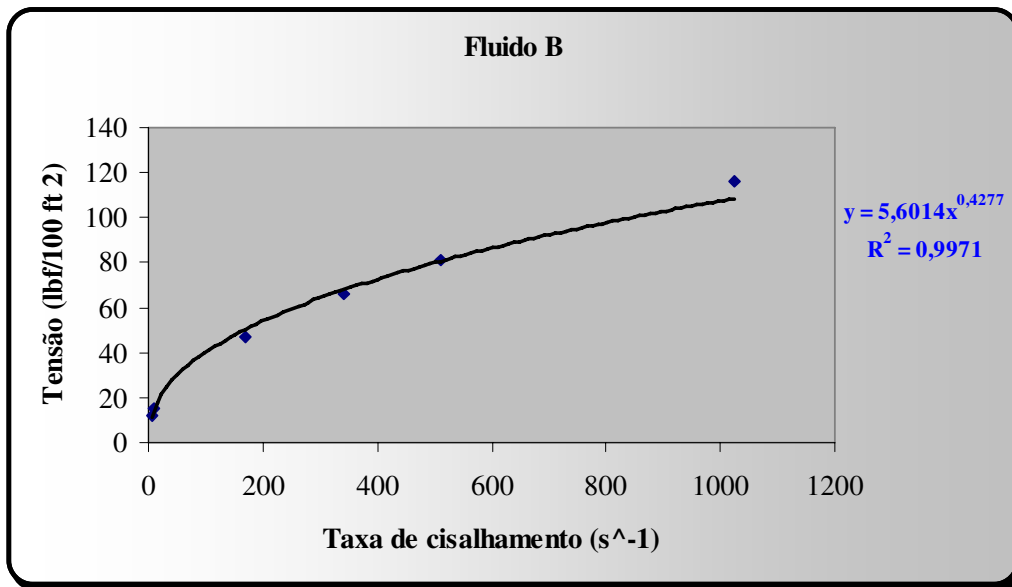


Figura 21 - Comportamento da tensão em função da taxa de cisalhamento para o fluido B.

O comportamento do fluido B por sua vez, é representativo do modelo de potência.

A figura 22 apresenta o comportamento da tensão em função da taxa de cisalhamento para o fluido C.

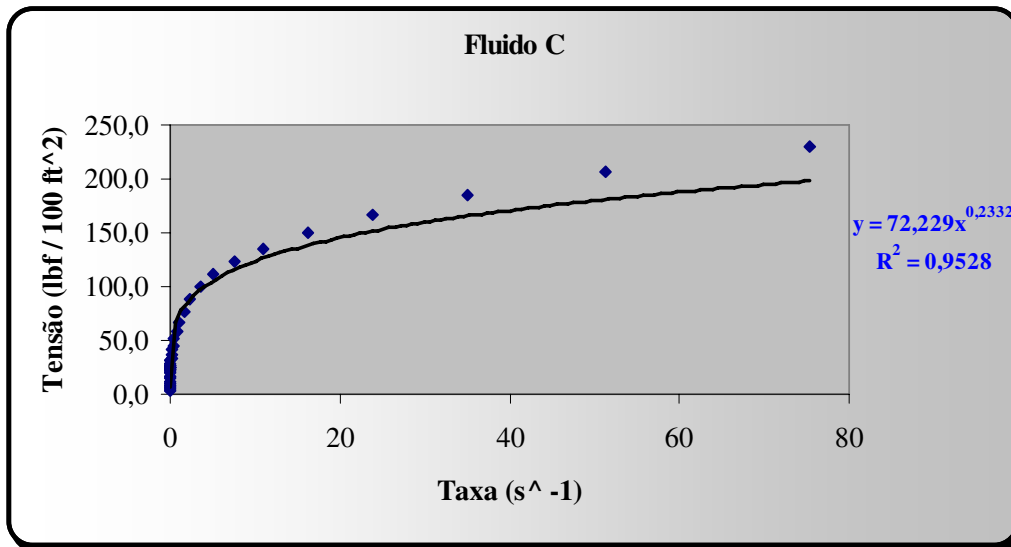


Figura 22 - Comportamento da tensão em função da taxa de cisalhamento para o fluido C.

O comportamento do fluido C também é representativo do modelo de potência.

### 5.3 Determinação da função viscosidade com o tempo

As amostras foram submetidas à elevada taxa de deformação antes do teste para assegurar que qualquer crescimento de gel antes da análise seria destruído. Em seguida, a utilização de uma taxa baixa de modo a não afetar à formação do gel foi aplicada e avaliada durante certo tempo, até a viscosidade tornar-se constante, momento no qual o gel estaria completamente formado.

A partir dos resultados obtidos dos ensaios reológicos no ARES foi possível determinar como a viscosidade se comporta com o tempo e propor uma função que representasse esse modelo.

A Figura 23 representa o resultado da análise reológica do Fluido A.

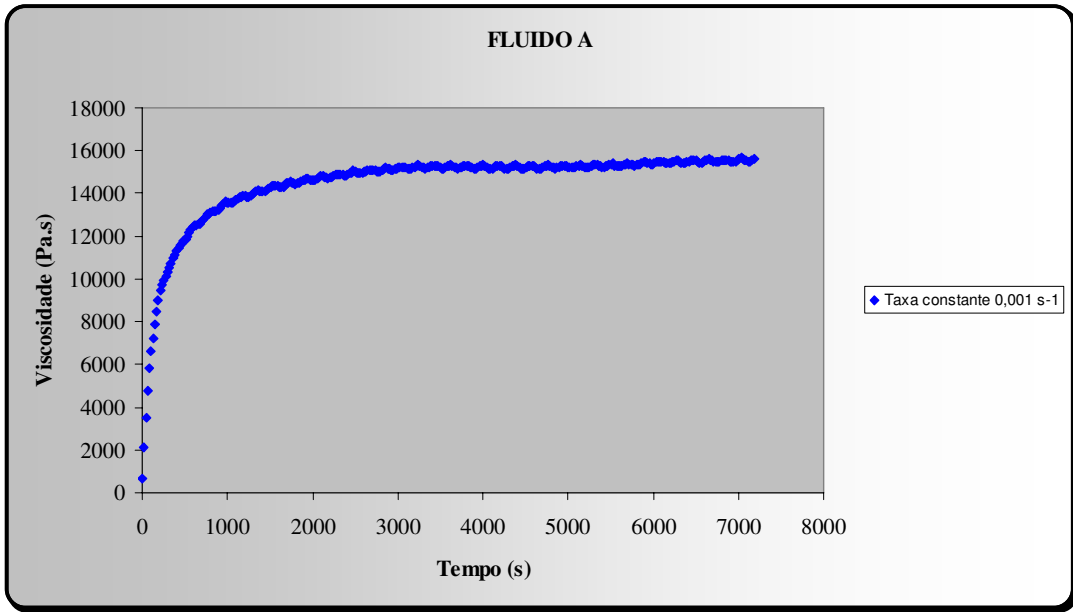


Figura 23 - Comportamento da viscosidade com o tempo para o Fluido A.

A Figura 24 representa o resultado da análise reológica do Fluido B.

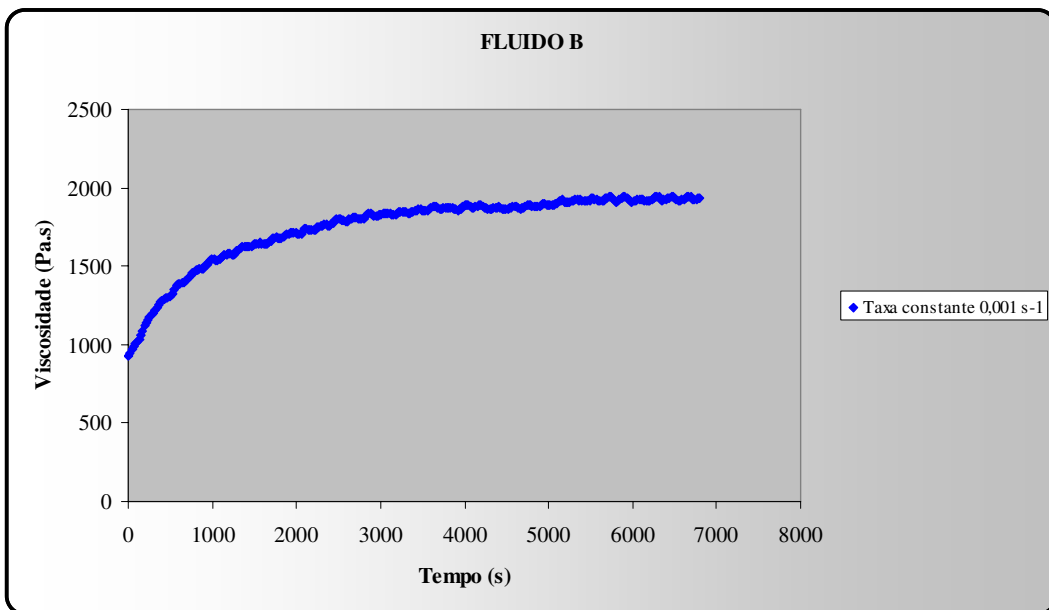


Figura 24 - Comportamento da viscosidade com o tempo para o Fluido B.

A Figura 25 representa o resultado da análise reológica do Fluido C.

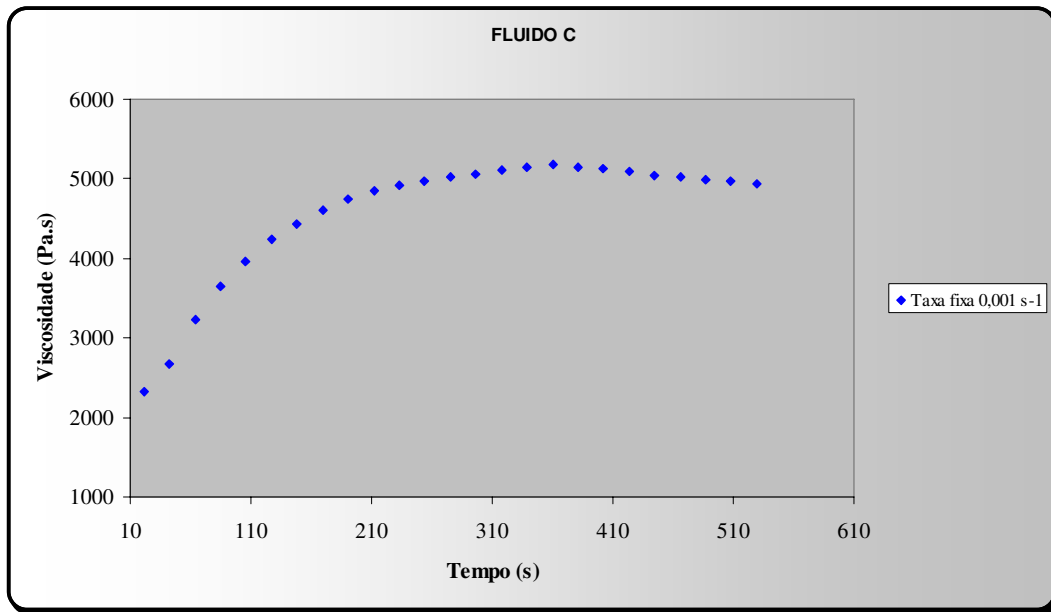


Figura 25 - Comportamento da viscosidade com o tempo para o Fluido C.

Uma linha de tendência foi traçada sobre os gráficos dos ensaios reológicos dos fluidos A, B e C para propor qual o modelo seria representativo para avaliar o comportamento da viscosidade com o tempo. Após avaliação do melhor coeficiente de correlação, escolheu-se a função de potência, conforme a Equação (5.2).

$$\eta = \eta_0 + a.t^b \quad (5.2)$$

Onde

$\eta$  - viscosidade aparente do fluido para um determinado tempo;

$\eta_0$  - viscosidade aparente do fluido imediatamente antes da gelificação;

$a$  e  $b$  – parâmetros obtidos do ensaio reológico da viscosidade em função do tempo.



---

## Capítulo 6

Estudo de caso

---

## 6.1 Sedimentação durante conexões e manobras

Durante as operações de perfuração de um poço algumas paradas fazem parte do processo normal, tais como as conexões das seções de tubos e as manobras que são necessárias para trocar uma broca que já se desgastou, por exemplo. Outras paradas indesejáveis podem ocorrer devido a problemas operacionais e causar perdas irreparáveis caso não haja um bom controle de certos parâmetros, dentre os quais, as propriedades reológicas do fluido utilizado durante a perfuração.

Operacionalmente, quando o topo do *kelly* ou do motor (no caso do *top drive*) atinge a mesa rotativa, é necessário acrescentar um novo tubo à coluna de perfuração. Esta “conexão” se procede da seguinte maneira:

- Coloca-se o tubo a ser acrescentado junto à mesa rotativa;
- Eleva-se o *kelly* até o primeiro tubo de perfuração aparecer e coloca-se a cunha na coluna para sustentar o peso na mesa rotativa;
- Desconecta-se o *kelly* da coluna e conecta-se ao tubo de perfuração a ser adicionado;
- Eleva-se o conjunto *kelly*/tubo de perfuração e conecta novamente à coluna;
- Retira-se a cunha e desce a coluna até o *kelly* encaixar na mesa rotativa e continua a perfuração.

Uma manobra se completa quando ocorre a retirada e descida de toda a coluna de perfuração para substituição da broca, por exemplo. A retirada da coluna se faz elevando-a e colocando a cunha para sustentar o peso da coluna na mesa rotativa. Em seguida, desconecta-se a seção, composta por geralmente três tubos, e faz-se o estaleiramento no mastro. A seqüência inversa é aplicada para descida.

Devido ao caráter gelificante de alguns fluidos de perfuração, suas propriedades quando estão sob movimento são diferentes de quando estão parados. A necessidade do conhecimento de como a viscosidade do fluido evolui com o tempo quando ocorre uma parada no bombeio do fluido é importante para prever como as partículas que estavam sendo carregadas para fora do poço se comportarão e se poderão causar problemas no prosseguimento da operação de perfuração.

Para fazer essa avaliação, esse estudo de caso contempla a simulação do comportamento da velocidade de sedimentação e do deslocamento das partículas com o tempo durante as paradas operacionais. Será considerado que numa perfuração

convencional o tempo de parada para a conexão de uma seção de tubos é de em média 5 minutos. A concentração de partículas será considerada 4% (valor médio de campo). Os parâmetros referentes à partícula, fluido e poço estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4- Parâmetros referentes à partícula, fluido e poço

Dados da partícula, do fluido e do poço				
Parâmetros		Unidades de campo		Unidade S.I.
$d_p$	0,31	in	7,92E-03	m
$\rho_p$	20,86	lb/gal	2500	Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_f$	7,99	lb/gal	958	Kg/m <sup>3</sup>
$D_p$	8,5	in	2,16E-01	m
$d_t$	4,5	in	1,14E-01	m
$d_a$	4	in	1,02E-01	m

Onde:

$d_p$  – diâmetro da partícula;

$\rho_p$  – massa específica da partícula;

$\rho_f$  - massa específica do fluido;

$D_p$  – diâmetro do poço;

$d_t$  – diâmetro do tubo de perfuração;

$d_a$  – diâmetro do espaço anular ( $D_p - d_t$ ).

## 6.2 Procedimento de cálculo

As equações constitutivas que regem o comportamento do fluido com a taxa de cisalhamento e com o tempo são conhecidas e podem ser descritas respectivamente pela Equação (3.39) que se refere ao modelo reológico de potência que relaciona a viscosidade com a taxa de cisalhamento e a Equação (5.2) referente à função potência que relaciona a viscosidade com o tempo, conforme apresentadas no procedimento a seguir. Os efeitos de fronteiras rígidas, concentração de partículas e forma das partículas serão considerados e ponderados na equação de velocidade de sedimentação, de modo à

melhor representar o comportamento das partículas no anular do poço durante a perfuração.

Portanto, o procedimento iterativo descrito no capítulo 4 de forma generalizada, pode ser avaliado para este caso particular, adotando-se o modelo proposto, conforme seqüência abaixo. Neste trabalho utilizou-se um procedimento computacional para resolução dos cálculos.

### **No instante $t_0$ :**

1. A partir das análises reológicas verifica-se o modelo que melhor representa o fluido e determina-se os parâmetros reológicos (SIMCARR), neste caso,  $k$  e  $n$  para o modelo de Potência (Equação 3.39);

2. Através de uma correlação de viscosidade com a taxa de deformação, estima-se a taxa e determina-se a viscosidade, conforme descrito no capítulo 3 pela Equação (3.40) para o caso do modelo de Potência;

3. A partir de uma correlação de velocidade com a viscosidade determina-se a velocidade de sedimentação conforme descrito no capítulo 2, ponderando com os parâmetros relativos à forma das partículas, fronteiras rígidas e concentração de partículas, mediante apresentado no capítulo 3. Ao combinar as Equações (2.15), (3.2), (3.7) e (3.21) obtém-se:

$$v_p = \frac{0,545 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d_p^2 \cdot (k_\varepsilon) \cdot (k_\beta) \cdot (k_{cv})}{\eta} \quad (6.1)$$

4. Através de uma correlação de taxa de deformação com a velocidade determina-se a nova taxa de deformação. Para este estudo utilizou-se a Equação (3.31) proposta por Almeida (1995);

5. Compara-se a taxa inicialmente estimada com a determinada no item 4 e caso diferente substituir a nova taxa no item 2. O processo é iterativo até convergência da taxa de deformação, viscosidade e velocidade.

### Evolução no tempo

Ao cessar o bombeio, o fluido inicia o processo de gelificação e sua viscosidade começa a aumentar. Os novos parâmetros reológicos referentes à nova viscosidade são obtidos a partir dos ensaios da tensão em função do tempo utilizando-se uma taxa de deformação fixa, pequena o suficiente para não interferir na formação do gel, e os valores de tensão são relacionados com esta taxa para obtenção da viscosidade em função do tempo (Equação 5.2).

Considerando o mesmo índice de comportamento  $n$  (devido utilizar o mesmo fluido), deve-se determinar o novo parâmetro reológico  $k$  representativo da viscosidade depois de determinado tempo de formação do gel.

Na determinação do parâmetro  $k_i$  para o tempo  $t_i$ , relaciona-se a viscosidade  $\eta_i$  após determinado  $t_i$ , com a viscosidade inicial  $\eta_0$ , imediatamente antes da parada do bombeio, ponderando-se com o parâmetro  $k_0$ . As Equações (6.2) e (6.3) representam as viscosidades para cada tempo:

$$\eta_0 = k_0 \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} \quad p/ t_0 \quad (6.2)$$

$$\eta_i = k_i \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} \quad p/ t_i \quad (6.3)$$

Dividindo a Equação (6.3) pela (6.2) obtém-se:

$$k_i = k_0 \cdot \left( \frac{\eta_i}{\eta_0} \right) \quad (6.4)$$

O procedimento iterativo é retomado a partir do item 2 até a convergência da nova taxa de deformação, viscosidade e velocidade para esse novo tempo.

Obtida a viscosidade para o novo tempo  $i$ , determina-se a velocidade em função da viscosidade conforme Equação (6.1) e o deslocamento ( $s$ ) a partir da correlação de velocidade:

$$\Delta s = v_p \cdot \Delta t \quad (6.5)$$

Onde:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i$$

O fluxograma que representa este procedimento iterativo é descrito pela Figura 26.

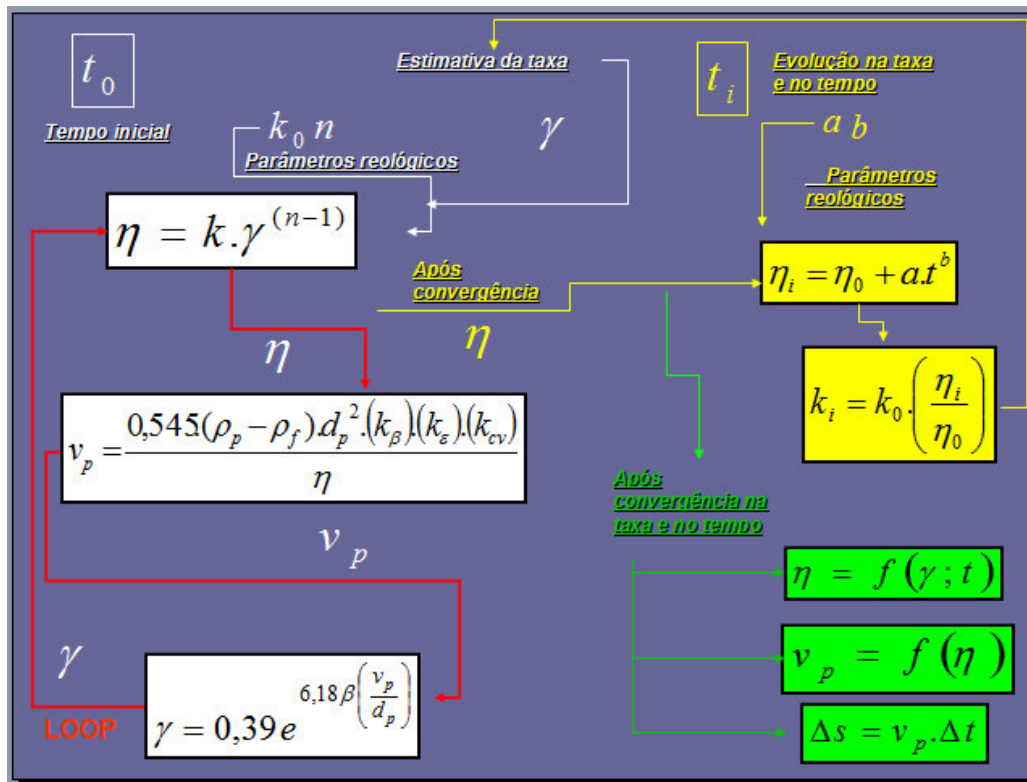


Figura 26 - Fluxograma para determinação do deslocamento das partículas dentro do poço.

Este procedimento é convergente para certas funções. Caso sejam utilizadas outras funções diferentes das obtidas neste estudo deve-se avaliar a garantia de convergência através de uma análise detalhada dos cálculos.

### 6.3 Análise de sensibilidade

Considerando que na composição da coluna de perfuração existe equipamentos que reduzem o espaço anular poço-coluna de perfuração, tornando ainda mais crítico o aprisionamento da coluna, deve-se avaliar uma mudança nos parâmetros reológicos dos fluidos para que melhorem suas características gelificantes, de modo rápido e não progressivo caso não sejam satisfeitas as propriedades de sustentação das partículas.

Para apresentar como os parâmetros reológicos referentes ao processo de gelificação influenciam no comportamento do fluido, esta análise de sensibilidade considerou variação nos seguintes parâmetros:

- $a$  – parâmetro multiplicativo do tempo presente na equação da viscosidade em função do tempo;
- $b$  - expoente do tempo presente na equação da viscosidade em função do tempo;

Para obtenção de dados quantitativos reais, neste estudo utilizou-se como exemplo os parâmetros reológicos referentes ao fluido B.

### 6.3.1 Análise referente ao parâmetro multiplicativo do tempo presente na equação da viscosidade em função do tempo ( $a$ )

Considerando o valor obtido experimentalmente de  $a = 595,0 Pa.s^b$  (Fluido B), avaliou-se o comportamento da viscosidade em função da taxa e do tempo para valores de  $1000.a$  e  $0,001.a$ . Esses fatores são apenas para avaliar a consistência das equações para valores bem maiores e bem menores que o experimental que porventura seja característico de outros fluidos. A Figura 27 apresenta os resultados:

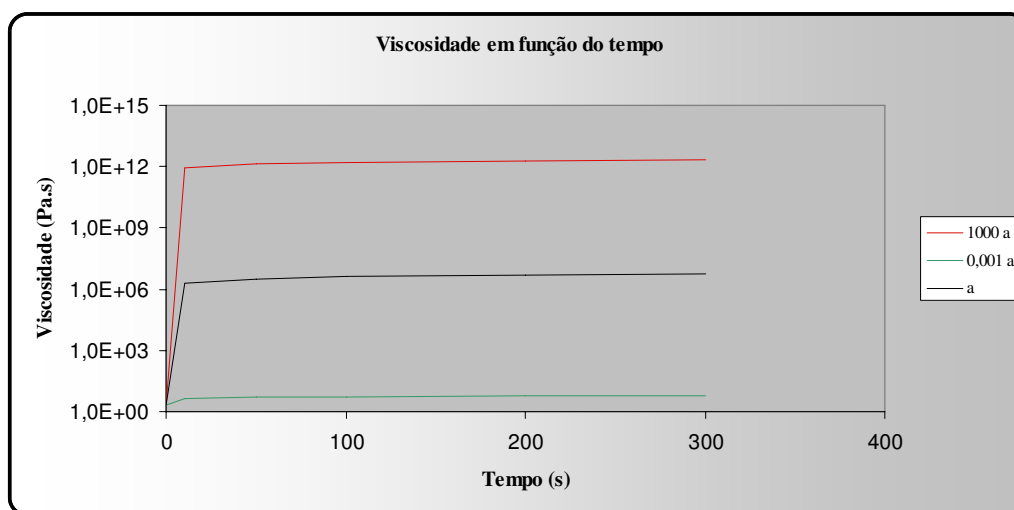


Figura 27 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( $a$ ) para a viscosidade do fluido.

Observando o comportamento da viscosidade com tempo para o parâmetro multiplicativo do tempo presente na equação da viscosidade em função do tempo ( $a$ ) verifica-se que a viscosidade aumenta com o referido parâmetro e diminui com sua redução. A explicação para este comportamento diretamente proporcional é baseado nas equações constitutivas do modelo:

- ❖ Mantendo-se os parâmetros reológicos  $k$  e  $n$  inalterados verifica-se que a viscosidade para o **tempo inicial** é constante, pois depende apenas desses parâmetros:  $\eta_0 = k_0 \cdot (\dot{\gamma})^{n-1}$ ;
- ❖ O valor de  $\eta_i$  obtido através da função proposta para **evolução no tempo**:  $\eta_i = \eta_0 + a \cdot t^b$ , aumenta com o tempo e será tanto maior quanto for o valor de ( $a$ ) (mantido  $b$  constante).
- ❖ Para **evolução no tempo**, a determinação de  $k_i$  é feita a partir da relação:  $k_i = k_0 \cdot \left( \frac{\eta_i}{\eta_0} \right)$ , onde a razão  $\left( \frac{\eta_i}{\eta_0} \right)$  é maior para quanto maior for o valor de ( $a$ ).

Portanto, maiores valores de ( $a$ ) implicam em maiores  $k_i$  e conseqüentemente ao retomar o procedimento para o cálculo da viscosidade evoluindo no tempo e na taxa:  $\eta_i = k_i \cdot (\dot{\gamma})^{n-1}$  a viscosidade será maior.

Com relação à velocidade das partículas em função do tempo, o comportamento é representado pela Figura 28.

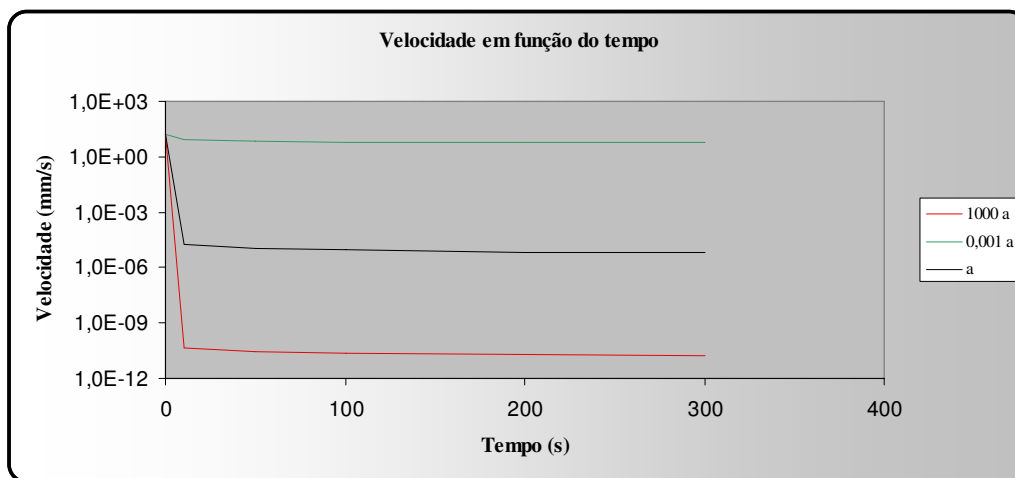


Figura 28 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( $a$ ) para a velocidade das partículas.



Verifica-se que a velocidade das partículas diminui com o tempo, comportamento característico devido ao aumento da viscosidade. Para a comparação de cada ( $a$ ), a velocidade é menor para o maior valor de ( $a$ ), o qual representa maior viscosidade.

Com relação ao deslocamento das partículas com o tempo, o comportamento é representado pela Figura 29:

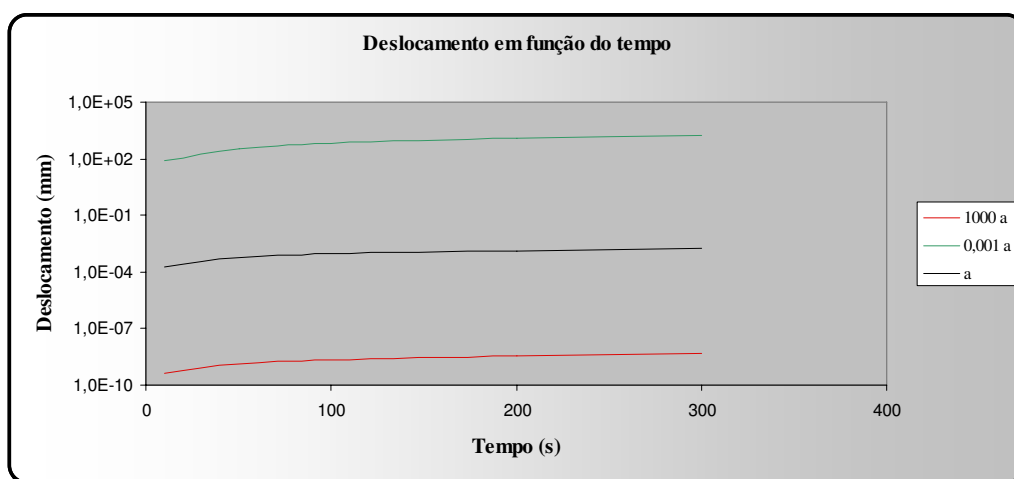


Figura 29 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( $a$ ) para o deslocamento das partículas.

O reduzido deslocamento das partículas para maiores valores do parâmetro ( $a$ ) é reflexo da baixíssima velocidade ocasionada pela altíssima viscosidade do fluido. Para a comparação de cada ( $a$ ), as partículas percorrerão uma menor distância no caso em que o fluido apresentar maior evolução da viscosidade com o tempo, ou seja, para maiores valores de ( $a$ ).

### 6.3.2 Análise referente ao expoente do tempo presente na equação da viscosidade em função do tempo ( $b$ )

Considerando o valor obtido experimentalmente de  $b = 0,13$  (Fluido B), avaliou-se o comportamento da viscosidade em função da taxa e do tempo para valores de  $3,0 b$  e  $0,3 b$ . Novamente, esses fatores são apenas para avaliar a tendência da viscosidade para valores maiores e menores que o experimental. A Figura 30 representa os resultados:

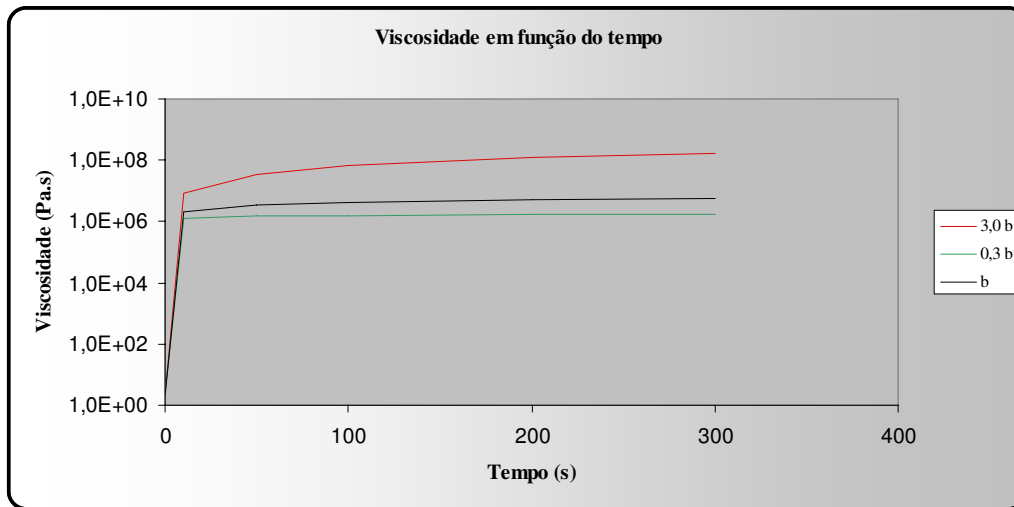


Figura 30 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( $b$ ) para a viscosidade do fluido.

Observando o comportamento da viscosidade com tempo para o parâmetro ( $b$ ) verifica-se que a viscosidade aumenta com o referido parâmetro de forma progressiva. Mesmo utilizando valores relativamente reduzidos de ( $b$ ) a viscosidade permanece elevada (da ordem de  $10^6$ ) visto que o valor experimental de ( $a$ ) é predominante, entretanto esse aumento não se dá de forma progressiva. A explicação para este comportamento diretamente proporcional é baseado nas equações constitutivas do modelo:

- ❖ Mantendo-se os parâmetros reológicos  $k$  e  $n$  inalterados verifica-se que a viscosidade para o **tempo inicial** é constante, pois depende apenas desses parâmetros:  $\eta_0 = k_0 \cdot (\dot{\gamma})^{n-1}$ ;
- ❖ O valor de  $\eta_i$  obtido através da função proposta para **evolução no tempo**:  $\eta_i = \eta_0 + a \cdot t^b$ , aumenta com o tempo e será tanto maior quanto for o valor de ( $b$ ) (mantido  $a$  constante), crescendo de forma potencial;
- ❖ Para **evolução no tempo**, a determinação de  $k_i$  é feita a partir da relação:

$$k_i = k_0 \cdot \left( \frac{\eta_i}{\eta_0} \right), \text{ onde a razão } \left( \frac{\eta_i}{\eta_0} \right) \text{ é maior para quão maior for o valor de } (b).$$

Portanto, maiores valores de ( $b$ ) implicam em maiores  $k_i$  e conseqüentemente ao retomar o procedimento para o cálculo da viscosidade evoluindo no tempo e na taxa:

$$\eta_i = k_i \cdot (\dot{\gamma})^{n-1}$$

a viscosidade será maior.

Com relação à velocidade das partículas em função do tempo, o comportamento pode ser apresentado pela Figura 31:

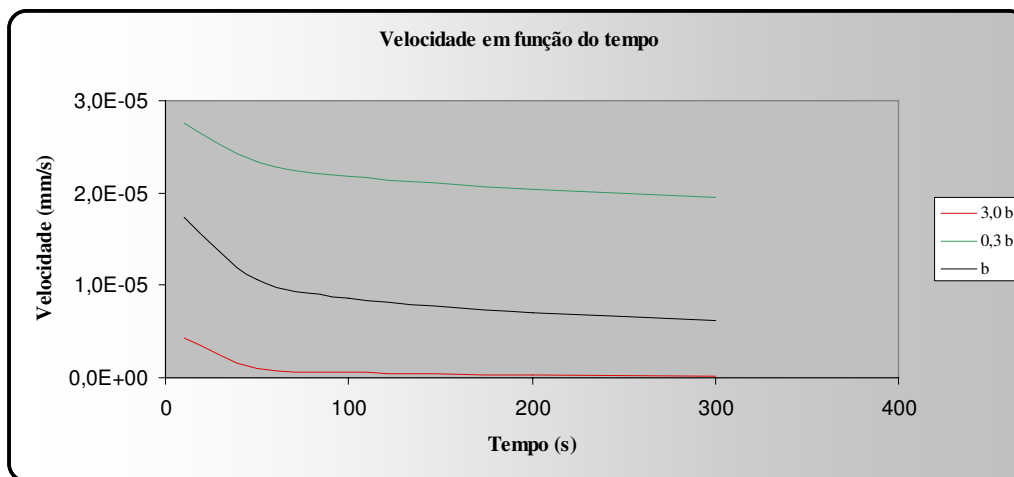


Figura 31 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( $b$ ) para a velocidade das partículas.

Para a comparação de cada ( $b$ ), a velocidade é menor para o maior valor de ( $b$ ) o qual representa maior viscosidade.

Com relação ao deslocamento das partículas com o tempo, o comportamento é representado pela Figura 32:

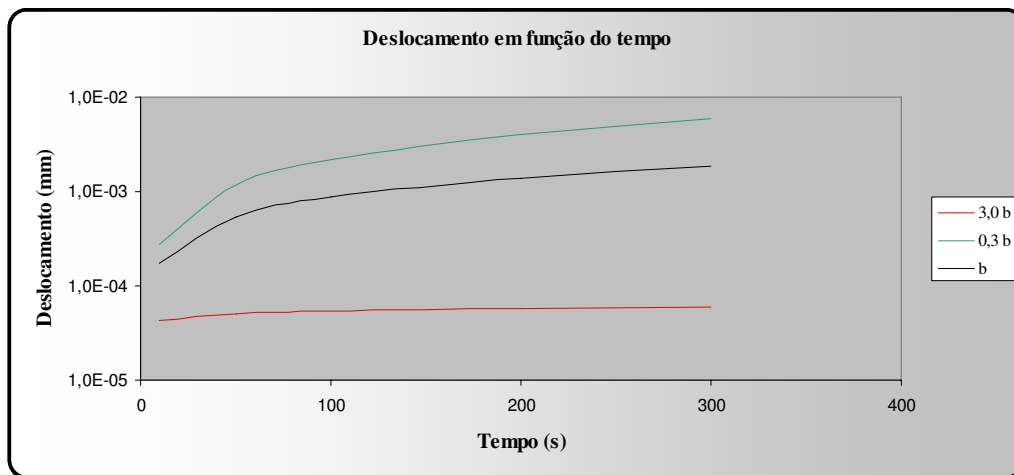


Figura 32 - Análise de sensibilidade referente ao parâmetro ( $b$ ) para o deslocamento das partículas.

Para a comparação de cada  $(b)$ , as partículas percorrerão uma menor distância no caso em que o fluido apresentar maior evolução da viscosidade com o tempo, ou seja, para maiores valores de  $(b)$ .

Portanto, para os parâmetros  $(a)$  e  $(b)$  a atuação na viscosidade é diretamente proporcional. Para pequenos valores de tempo o parâmetro  $(a)$  possui maior influência e à medida que o tempo aumenta o parâmetro  $(b)$  que se comporta como expoente do tempo se manifesta de maneira mais pronunciada. Esse comportamento é esperado exatamente devido ao aumento potencial gerado pelo parâmetro  $(b)$ .

Para o caso de um aumento rápido e não progressivo da viscosidade é necessário que o valor de  $(a)$  seja relativamente elevado e o valor de  $(b)$  reduzido visto que a evolução no tempo vai ser mais dependente de  $(b)$  e quanto maior esse valor maior será a tendência ao crescimento de forma progressiva.

### **6.3.3 Análise de sensibilidade para avaliar o deslocamento das partículas e o grau de gelificação do fluido B.**

Para esta análise, primeiramente será apresentado o comportamento da viscosidade, velocidade e deslocamento das partículas com o tempo para os dados obtidos para o fluido B experimentalmente. Em seguida será realizada uma análise do grau de gelificação do fluido, ou seja, de quanto o valor da viscosidade aumenta devido às características gelificantes do fluido, que por sua vez está diretamente relacionada com os parâmetros  $(a)$  e  $(b)$ . Será avaliado também o comportamento do deslocamento das partículas para um determinado tempo com diferentes valores do parâmetro  $(a)$  e  $(b)$ . Por fim, será avaliado o comportamento da viscosidade, deslocamento e velocidade das partículas quando água é utilizada como fluido.

Através de testes comparativos durante o estudo experimental de sedimentação, conforme já apresentado no capítulo 5 e durante avaliação da viscosidade do fluido B com o tempo, conforme Figura 33, a equação 3.37 proposta por Chien (Bourgoyne, 2005) e a equação 6.1 desenvolvida nesse estudo apresentam resultados relativamente consistentes, portanto a equação 3.37 será utilizada nas análises seguintes e especialmente na determinação da velocidade das partículas na análise de sensibilidade utilizando água, fluido não viscoso onde a equação 6.1 não se aplica, conforme explicado no capítulo 2 durante sua dedução.

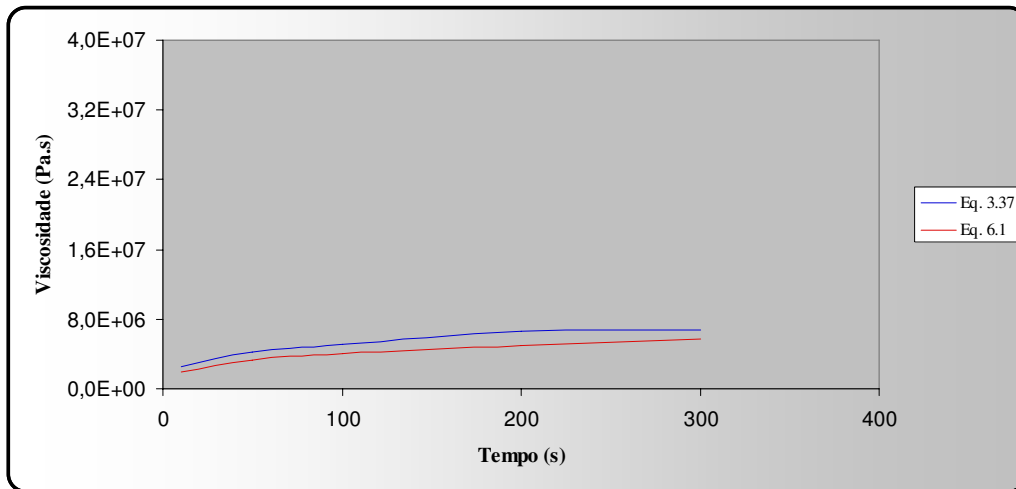


Figura 33 - Avaliação da viscosidade do fluido B com o tempo utilizando as eq. 3.37 e 6.1.

### 6.3.3.1 Análise de sensibilidade para avaliar a viscosidade do fluido, velocidade e deslocamento das partículas utilizando os dados experimentais.

A figura 34 apresenta o comportamento da viscosidade em função do tempo para o fluido B. Os parâmetros obtidos experimentalmente foram  $a = 595 \text{ Pa.s}^b$  e  $b = 0,13$ .

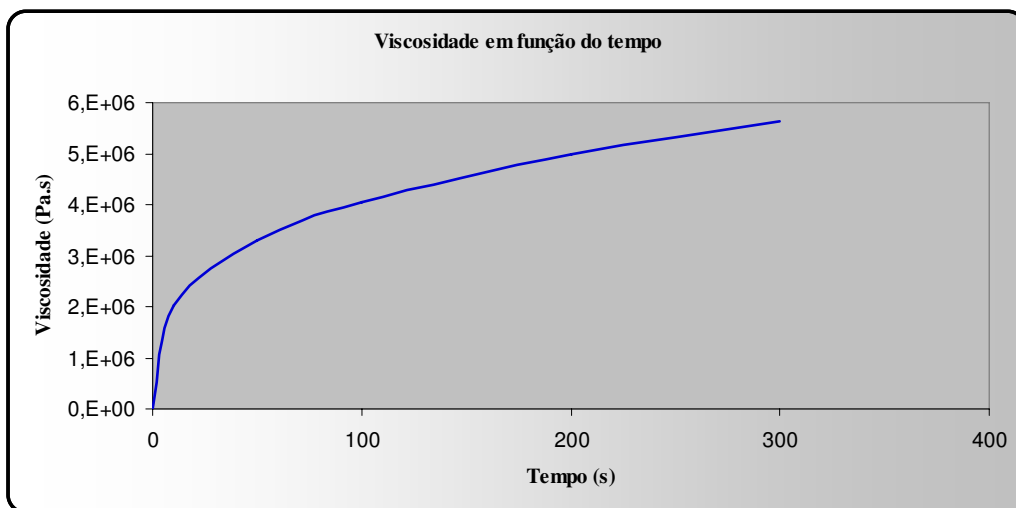


Figura 34 - Viscosidade em função do tempo para o fluido B com (a) e (b) obtidos experimentalmente.

Antes do processo de gelificação, a viscosidade inicial é de  $1,8 \text{ Pa.s}$ . Durante a gelificação verifica-se no intervalo de 10 a 300 segundos o crescimento de  $2,54 \times 10^6$  para  $6,82 \times 10^6 \text{ Pa.s}$ .

Com relação ao comportamento da velocidade das partículas em função do tempo, a representação é feita pela Figura 35.

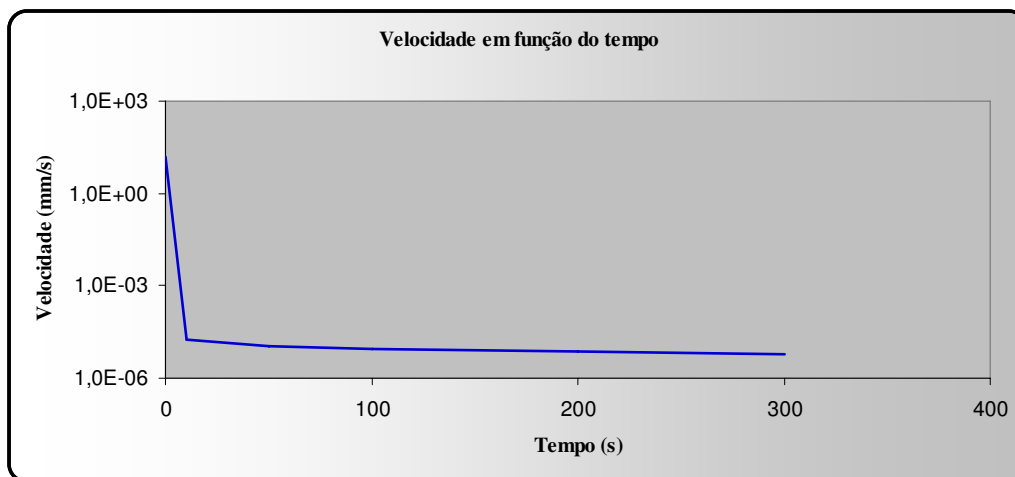


Figura 35 - Velocidade em função do tempo para o fluido B com (a) e (b) obtidos experimentalmente.

A velocidade das partículas de aproximadamente 22 mm/s é reduzida para aproximadamente  $6,6 \times 10^{-6}$  mm/s devido à elevação significativa da viscosidade.

Para o comportamento do deslocamento das partículas em função do tempo, a representação é feita pela Figura 36.

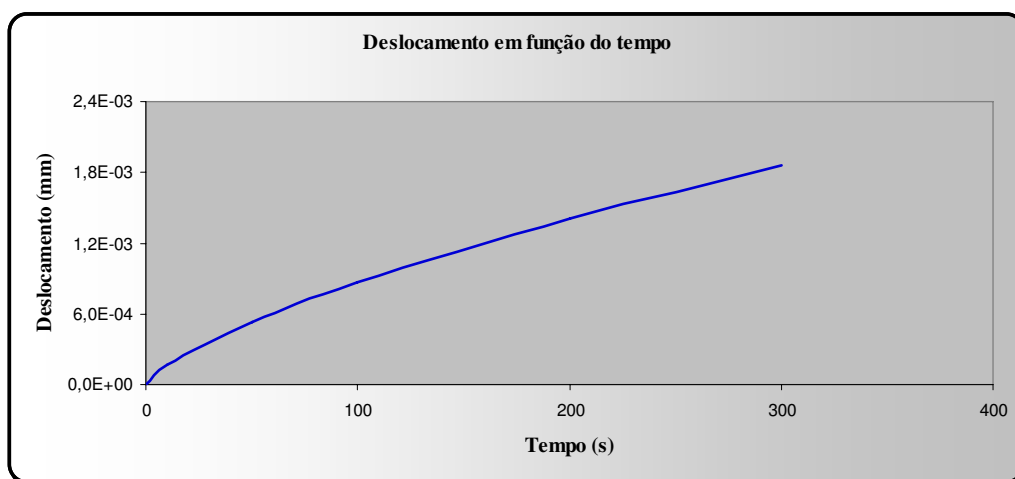


Figura 36 – Deslocamento das partículas em função do tempo para o fluido B com (a) e (b) obtidos experimentalmente.

De acordo com a análise, o deslocamento após os 300 s é de aproximadamente  $1,9 \times 10^{-3}$  mm, em conformidade com a baixíssima velocidade.

### 6.3.3.2 Análise de sensibilidade para avaliar o grau de gelificação do fluido em função dos parâmetros ( $a$ ) e ( $b$ ).

O grau de gelificação é resultado da relação entre o termo  $(a.t^b)$ , que é o responsável pelo aumento da viscosidade com o passar do tempo e a viscosidade total ( $\eta$ ), que é a soma da viscosidade inicial ( $\eta_0$ ) com o termo  $(a.t^b)$  conforme apresentado na equação 5.2. Devido o valor experimental de ( $\eta_0$ ) ser relativamente reduzido (1,8 Pa.s) a análise foi realizada para valores relativamente pequenos do parâmetro ( $a$ ) para que seja possível avaliar a relação  $\left(\frac{a.t^b}{\eta}\right)$  caso contrário devido ao elevado valor de ( $a$ ) obtido experimentalmente o termo  $(a.t^b)$  seria praticamente igual a ( $\eta$ ) e a relação tenderia imediatamente para 100%.

Os valores utilizados para o parâmetro ( $a$ ) foram 1,0; 2,0; 3,0; e 4,0. Os valores de ( $b$ ) foram 0,2 e 0,4. Os valores experimentais também foram apresentados ( $a = 595,0$  e  $b = 0,13$ ). As Figuras 37 e 38 apresentam os resultados.

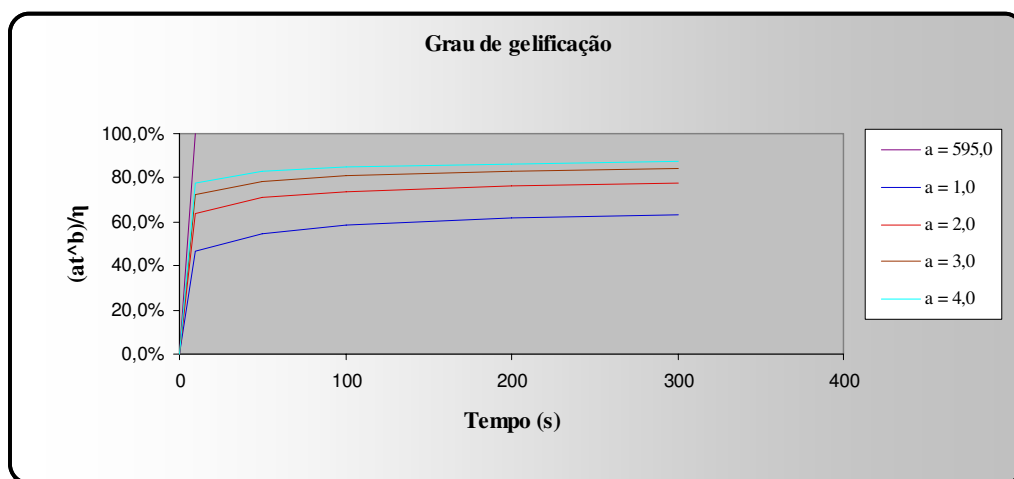


Figura 37 - Grau de gelificação em função do parâmetro ( $a$ ) para ( $b$ ) = 0,2.

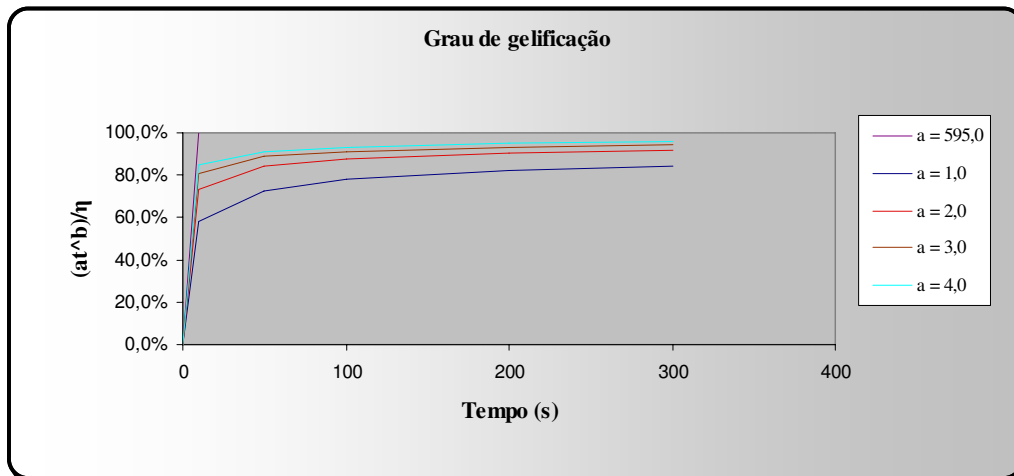


Figura 38 - Grau de gelificação em função do parâmetro ( $a$ ) para ( $b$ ) = 0,4.

Através das figuras 37 e 38 é possível constatar que o grau de gelificação é nulo para o tempo zero devido não ter iniciado o processo de gelificação, com menores valores no início, para menores valores de tempo, e tendência a um patamar para tempos elevados devido o termo  $(a.t^b)$  se tornar significativo quando comparado ao valor total ( $\eta$ ). Ao avaliar cada valor do parâmetro ( $a$ ) para um mesmo tempo constata-se que à medida que este parâmetro cresce o termo  $(a.t^b)$  se torna mais pronunciado e conseqüentemente o grau de gelificação aumenta. Por fim, à medida que o parâmetro ( $b$ ) aumenta verifica-se também o mesmo comportamento, ou seja, avaliando certo valor de tempo para o mesmo ( $a$ ) o termo  $(a.t^b)$  cresce e conseqüentemente o grau de gelificação aumenta.

Para o valor experimental verifica-se que o grau de gelificação imediatamente atinge o valor 100%. Isto é devido o reduzido valor de ( $\eta_0$ ) e o elevado valor do parâmetro ( $a$ ), tornando o termo  $(a.t^b)$  praticamente igual ao ( $\eta$ ).

A análise para os valores do parâmetro ( $b$ ) como sendo 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 e de ( $a$ ) igual a 2,0 e 6,0 também foi realizada. Os valores experimentais também foram apresentados ( $a = 595,0$  e  $b = 0,13$ ). As Figuras 39 e 40 apresentam os resultados.



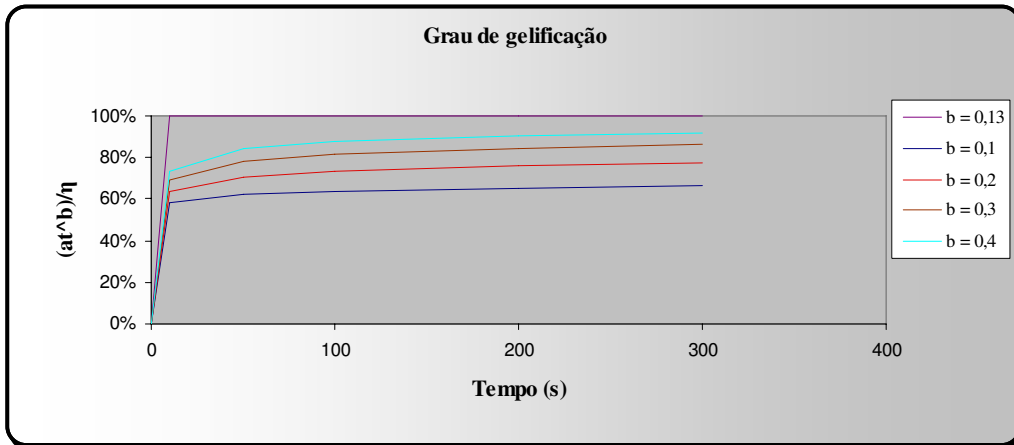


Figura 39 - Grau de gelificação em função do parâmetro ( $b$ ) para ( $a$ ) = 2,0.

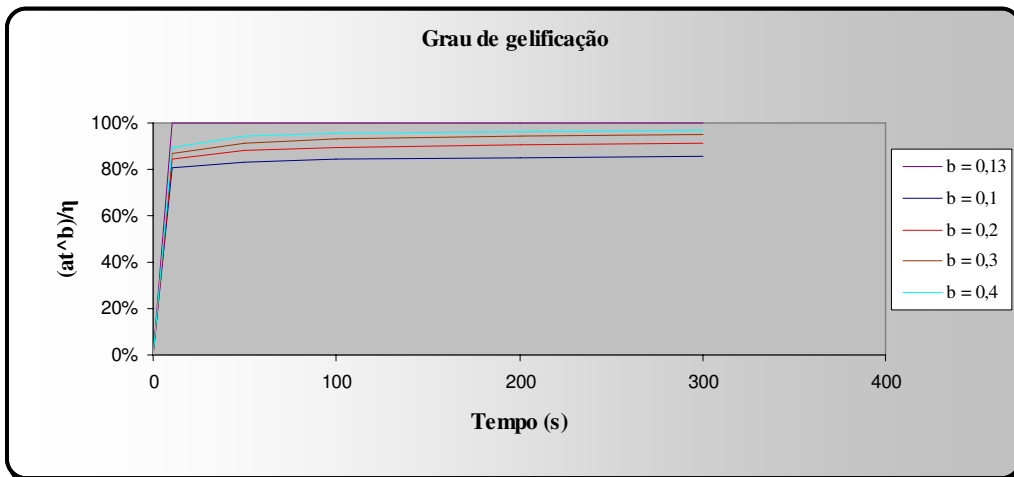


Figura 40 - Grau de gelificação em função do parâmetro ( $b$ ) para ( $a$ ) = 6,0.

Através das figuras 39 e 40 é possível constatar que o grau de gelificação é nulo para o tempo zero devido não ter iniciado o processo de gelificação, com menores valores no início, para menores valores de tempo, e tendência a um patamar para tempos elevados devido o termo  $(a.t^b)$  se tornar significativo quando comparado ao valor total  $(\eta)$ . Ao avaliar cada valor do parâmetro ( $b$ ) para um mesmo tempo constata-se que à medida que este parâmetro cresce o termo  $(a.t^b)$  se torna mais pronunciado e conseqüentemente o grau de gelificação aumenta. Por fim, à medida que o parâmetro ( $a$ ) aumenta verifica-se também o mesmo comportamento, ou seja, avaliando certo valor de tempo para o mesmo ( $b$ ) o termo  $(a.t^b)$  se torna mais pronunciado e conseqüentemente o grau de gelificação aumenta.

Para o valor experimental verifica-se que o grau de gelificação imediatamente atinge o valor 100%. Isto é devido o reduzido valor de  $(\eta_0)$  e o elevado valor do parâmetro  $(a)$ , tornando o termo  $(a.t^b)$  praticamente igual ao  $(\eta)$ .

### 6.3.3.3 Análise de sensibilidade para avaliar o grau de gelificação do fluido em função da viscosidade inicial do fluido $(\eta_0)$ .

Quando o valor da viscosidade inicial  $(\eta_0)$  for mais pronunciado quando comparado com os parâmetros  $(a)$  e  $(b)$ , estes não afetarão de forma tão significativa como ocorreu na análise anterior onde  $(\eta_0)$  era relativamente reduzido. Para esta análise serão atribuídos valores maiores à  $(\eta_0)$ , os quais podem ser característicos de outros fluidos, para avaliar o comportamento do grau de gelificação. A Figura 41 apresenta os resultados para valores de  $(\eta_0) = 378; 970; 1894$  além do valor obtido experimentalmente de 1,8 Pa.s.

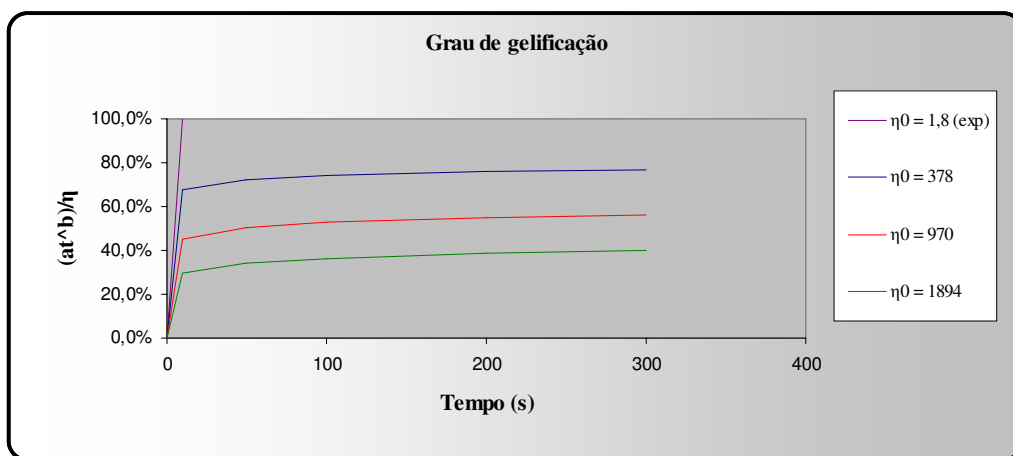


Figura 41 - Grau de gelificação em função de  $(\eta_0)$ .

Verifica-se que à medida que o valor de  $(\eta_0)$  aumenta o grau de gelificação é reduzido. Isto está de acordo com as equações constitutivas visto que o termo  $(a.t^b)$  será menos expressivo para a composição do valor da viscosidade total  $(\eta)$ . Nestes casos, os parâmetros  $(a)$  e  $(b)$  só seriam significativos quando apresentassem valores mais elevados para sobressaíssem com relação a  $(\eta_0)$ .

#### 6.3.3.4 Análise de sensibilidade para avaliar o deslocamento das partículas em função dos parâmetros ( $a$ ) e ( $b$ ).

Foi avaliado como o deslocamento das partículas se comporta quando os parâmetros ( $a$ ) e ( $b$ ) são modificados para o tempo de 300s. A Figura 42 apresenta os resultados para os valores de ( $a$ ) = 1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 e ( $b$ ) = 0,2; 0,3 e 0,4.

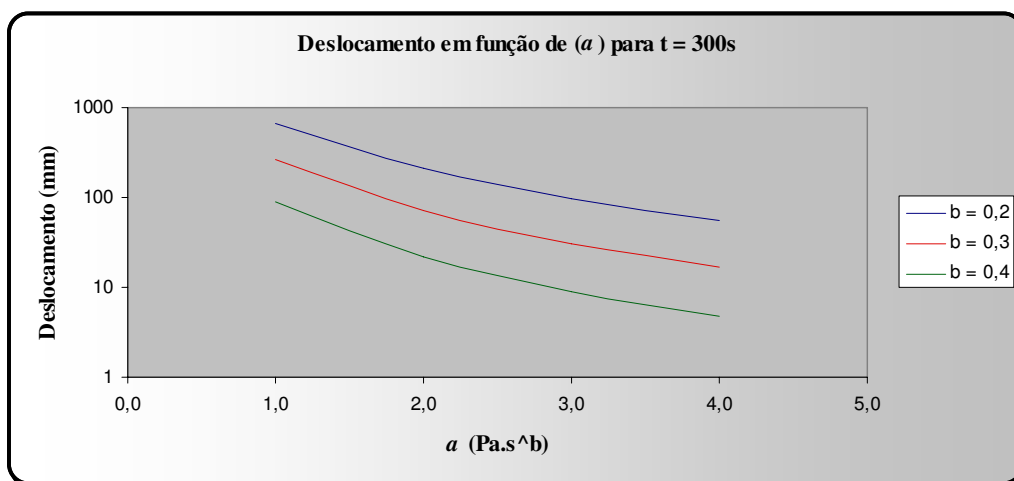


Figura 42 - Deslocamento das partículas em função do parâmetro ( $a$ ), para ( $b$ ) = 0,2; 0,3 e 0,4.

Avaliando individualmente cada curva, à medida que o valor do parâmetro ( $a$ ) aumenta o deslocamento das partículas diminui. Isto ocorre devido ao aumento da viscosidade do fluido e conseqüente redução da velocidade das partículas conforme apresentado anteriormente. Para o caso do aumento do parâmetro ( $b$ ) também se verifica que quanto maior este parâmetro maior será a viscosidade e conseqüentemente menor o deslocamento.

A Figura 43 apresenta o mesmo estudo utilizando os valores de ( $b$ ) = 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 e ( $a$ ) = 2,0; 4,0 e 6,0. A explicação é a mesma dada acima.

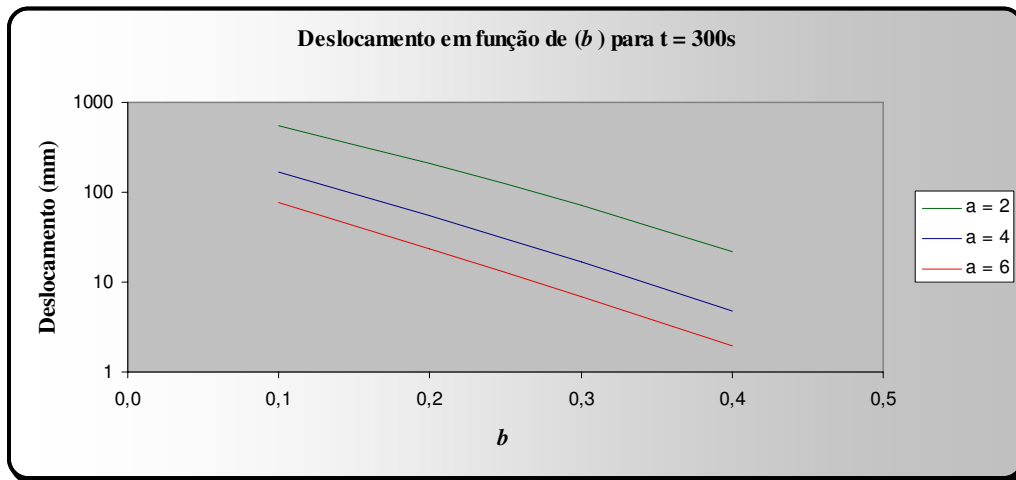


Figura 43 - Deslocamento das partículas em função do parâmetro ( $b$ ), para ( $a$ ) = 2; 4 e 6.

### 6.3.4 Análise de sensibilidade utilizando água como fluido.

Quando o fluido em análise se tratar da água, ou seja, fluido newtoniano que não apresenta características gelificantes ( $a$  e  $b = 0$ ), a viscosidade é constante (0,001 Pa.s) e bem reduzida quando comparada aos demais fluidos estudados. A Figura 44 apresenta o comportamento da viscosidade da água como função do tempo.

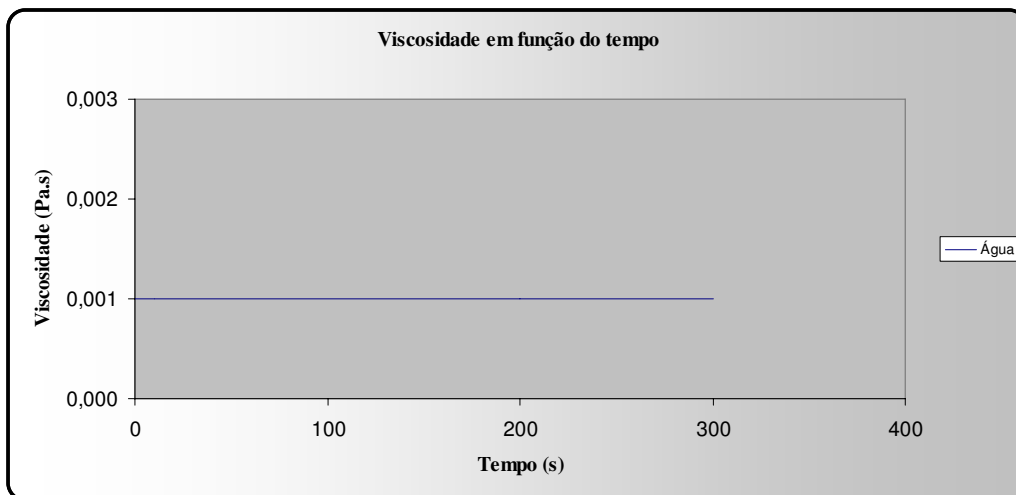


Figura 44 - Comportamento da viscosidade da água como função do tempo.

Com relação à velocidade das partículas, devido à viscosidade ser constante, a velocidade também será. A figura 45 apresenta o comportamento da velocidade das partículas com o tempo.

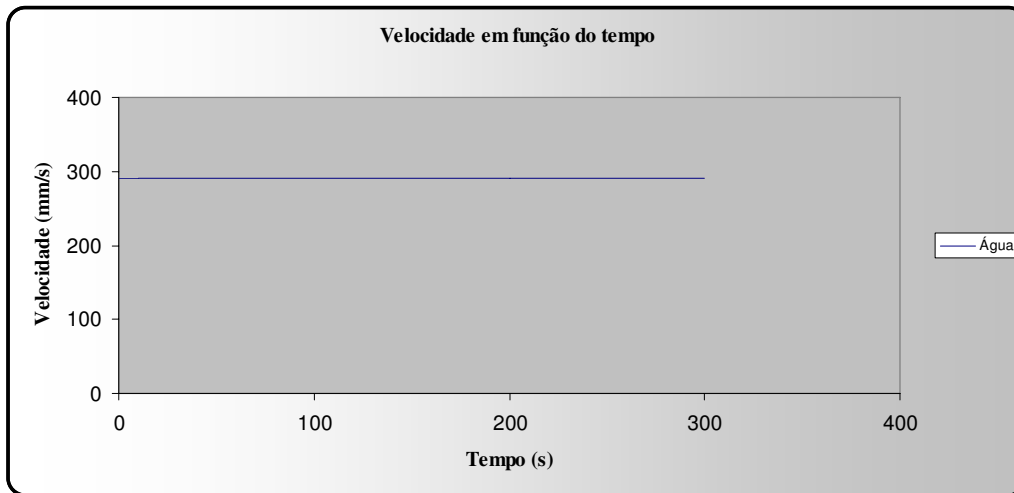


Figura 45 - Comportamento da velocidade das partículas como função do tempo para água.

Devido à viscosidade ser relativamente reduzida quando comparada com a dos fluidos em estudo, as partículas possuem maior velocidade.

E para o comportamento do deslocamento das partículas, a Figura 46 apresenta um aumento da profundidade de 291 mm para cada segundo.

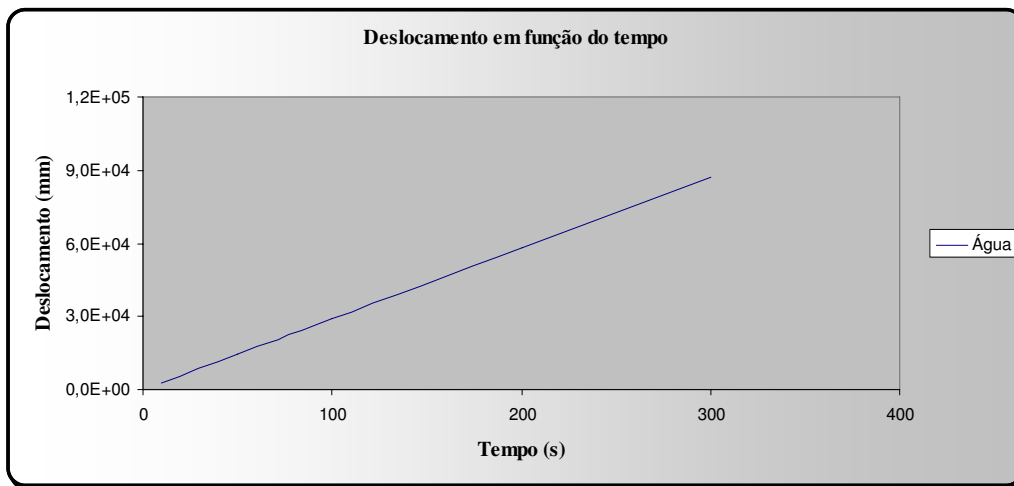


Figura 46 - Comportamento do deslocamento das partículas como função do tempo utilizando água.

Portanto, a tabela 5 apresenta uma síntese de como os parâmetros (a) e (b) influenciam no grau de gelificação, viscosidade, velocidade e deslocamento das partículas.

Tabela 5 – Influência dos parâmetros (*a*) e (*b*) no grau de gelificação, viscosidade, velocidade e deslocamento das partículas.

Parâmetro		Grau de gelificação	Viscosidade	Velocidade	Deslocamento
<b>a</b>	<b>umenta</b>	<b>umenta</b>	<b>umenta</b>	<b>diminui</b>	<b>diminui</b>
<b>b</b>		<b>umenta</b>	<b>umenta</b>	<b>diminui</b>	<b>diminui</b>

---

Capítulo 7

Conclusões

---

## 7. CONCLUSÕES

Com este trabalho, foi possível desenvolver uma equação representativa para velocidade de sedimentação de partículas em fluidos de viscosidade variável com o tempo, levando-se em considerações o efeito de fronteiras rígidas, que apresentou resultados coerentes com o estudo experimental, e também o efeito de concentração e forma de partículas para o caso da análise de sensibilidade com dados reais obtidos no campo. Desenvolveu-se também uma metodologia para avaliar o comportamento da viscosidade dos fluidos como função do tempo durante o processo de gelificação sem afetar a formação da estrutura. A metodologia implantada permite aplicação em estudos de construção de poços de petróleo para avaliar o comportamento dos cascalhos durante paradas operacionais. Para o projeto dos fluidos de perfuração, a mudança dos parâmetros reológicos interfere significativamente na viscosidade do fluido e conseqüentemente na velocidade de sedimentação e deslocamento dos cascalhos. Caso o fluido não apresente boa capacidade de sustentação dos cascalhos, ocasionando acúmulo no espaço anular ou até mesmo no fundo do poço durante as paradas operacionais, deve-se fazer uma avaliação para modificação dos parâmetros reológicos através da variação na composição ou nos aditivos a serem acrescentados ao fluido de maneira a modificar suas características gelificantes através dos parâmetros  $(a)$  e  $(b)$ . Foi constatado que o aumento desses parâmetros ocasiona aumento do grau de gelificação e da viscosidade além da redução da velocidade e do deslocamento das partículas. É desejável um processo de gelificação rápido e não progressivo para evitar que a pressão necessária para retomada da circulação exceda a pressão de fratura das formações sendo isto atingido com valores de  $(a)$  relativamente significativos, visto que ele é responsável pela rapidez do aumento da viscosidade em tempos curtos e para valores de  $(b)$  relativamente reduzidos visto que este último atua como expoente do tempo e é o responsável pelo controle da progressão da viscosidade no tempo.



---

## Capítulo 8

### Recomendações

---

## 8. RECOMENDAÇÕES

- Estudar os efeitos de temperatura no comportamento reológico dos fluidos utilizados na perfuração de poços de petróleo;
- Avaliar a cinemática de partículas gasosas em fluidos, tais como a migração de gás em pastas de cimento durante as operações com cimento;
- Estudar fluidos de composições diferentes das propostas neste estudo e os aditivos que influenciam nas propriedades reológicas e no processo de gelificação;
- Estudar outros modelos reológicos para representação do comportamento dos fluidos.
- Estudar outras equações de velocidade de sedimentação de partículas para outros fluidos, também realizando estudo experimental para verificar compatibilidade com a teoria.
- Estudar o transporte de partículas em poços inclinados e horizontais.
- Utilizar amostras de cascalhos reais no procedimento experimental.
- Estudar outras metodologias de cálculo para garantia da convergência do procedimento iterativo quando utilizar funções diferentes das propostas neste estudo.

## REFERÊNCIAS

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.

ARANHA, P. E. Avaliação do efeito de temperatura nos parâmetros reológicos dos fluidos Petrobras. **III Seminário de fluidos de perfuração e completção**. 1 a 3 de set., 2008. Macaé-RJ

ATAÍDE, C. H. et al., Wall effects on the terminal velocity of spherical particles in newtonian and non-newtonian fluids. **Braz. J. Chem. Eng.**, São Paulo, v. 16 n. 4, Dec., 1999.

BARNEA, E.; MIZRAHI, J. A generalized approach to the fluid dynamics of particulate systems. Part I. General correlation for fluidization and sedimentation in solid multiparticle systems. **Chem. Engineering J.**, v.5, p.1-189. 1973.

BEZERRA, J. R. M. V. **Comportamento reológico da polpa de manga**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

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

CHHABRA, R. P.; TIU, C.; UHLHERR, P. H. T. A Study of wall effects on the motion of a sphere in viscoelastic fluids. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 59, p. 771-775, 1981.

CHIEN, S. F. Settling velocity of irregularly shaped particles. **SPE Drilling & Completion**, p. 281, Dec. 1994.

CHURCHILL, S.W. The Development of theoretically based correlations for heat and mass transfer. First Latin American. In: **Congress on Heat and Mass Transfer**, La Plata, Argentina, p. 207, nov. 1983.

DEALY, J. M. and WISSBRUM, K. F. **Melt rheology and its role in plastics processing: theory and applications**. New York: Van Nostrand Reinhold; 1990.

DEDEGIL, M. Y. Drag coefficient and settling velocity of particles in non-newtonian suspensions, **Journal of Fluids Engineering**, v.187, p. 319. set. 1987.

FIDLERIS, V. and WHITMORE, R. L. Experimental determination of wall effect for spheres falling axially in cylindrical vessels. **British Journal of Applied Physics**, v. 12, p. 490-494.1961.

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

GOMES, J. E.; PERCIN, D.; MARTINS, A. B. G.; FONTES, S. R. Comportamento de propriedades físicas, químicas e reológicas do suco de acerola armazenado a baixas temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n. 2, 2001.

GOVIER, G. W.; AZIZ, K. **The flow of complex mixtures in pipes**. N. York: Van Nostrand, 1972.

GOZZO, A. M. **Comportamento reológico de chocolates ao leite sem fibras e enriquecido com fibras solúveis**. Dissertação (Mestrado) - Universidade estadual de Campinas ,UNICAMP, Campinas, 2003.

HOPKIN, E. A. Factors affecting cuttings removal during rotary drilling. **Shell Development Co. Petroleum Trans.**, p.807, Houston, Texas, 1967.

HOTTOVY, J. D. E SYLVESTER, N. D. Drag coefficients for irregularly shaped particles. **Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.**, v. 18, n. 3, p.433. 1979.

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.

LEWIS, M. J. **Propriedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado**. España: Acribia, 1993.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos – ênfase na indústria de petróleo**. Rio de Janeiro; Editora Interciência, 2002.

MASSARANI, G.; TELLES, S. A. Escoamento de fluidos não newtonianos na vizinhança das partículas sólidas. **Revista Brasileira de Física**, v. 8, p. 550-562, 1978.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.

PASQUEL, A. G. Utilização e aspectos reológicos. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 33, p. 86-97, 1999.

PENNA, A. L. B. **Parâmetros reológicos de gomas para fabricação de bebidas lácteas à base de soro**. Monografia (especialização) - Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, 1997.

PETTYJOHN, E. S, CHRISTIANSEN, E. B. Effect of particle shapes on free-settling rates of isomeric particles. **Chem. Eng. Progress**. v. 44, n.2, p.157-172, 1948.

PINTO, G. H. V. P., et al. Particle sedimentation in a time dependent viscosity fluid. In: **IV Brazilian Conference on Rheology**, Rio de Janeiro, Jul. 2-4, 2008.

PUC-RIO. **Certificação Digital 0115570/CA**. Revisão bibliográfica. Disponível em: [http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG\\_0599.EXE/8883\\_2.PDF?NrOcoSis=26695&CdLinPrg=pt](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG_0599.EXE/8883_2.PDF?NrOcoSis=26695&CdLinPrg=pt). Acesso em: 15 Maio 2008.

RAO, M. A., RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. New York: Marcel Dekker, 1986.

RICHARDSON, J. F. E ZAKI, W. N. Sedimentation and fluidization: **Trans. Inst. Chem. Eng.**, n.1, vol. 32, p. 35. 1954.

RAGUZZONI, J. C. **Efeito da adição de L-cisteína nas proteínas do glúten: análises reológica, térmica e microscópica**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SÁ, C. H. M., et al., Efeitos de parede e população na velocidade de queda de partículas irregulares em fluidos não-Newtonianos. **ENCIT - Encontro Nacional de Ciências Térmicas**. Santa Catarina, 1996.

SCHRAMM, S. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. Artliber editora, p. 232, São Paulo, 2006.

SOLUTIONS, T. I. R. **TA Instruments Thermal Analysis & Rheology: Rheology Solutions (AR 1000) – Flow, Oscillation**. p.1-3. New Castle, DE, 1996.

STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering**. 2. ed. USA: Freeman press, p. 418. 1996.

VALENTIK, L.; WHITMORE, R. L. The terminal velocity of spheres in bingham plastics. **Brit. J. Appl. Phys**, v. 116, p.1197, 1965.

TEIXEIRA, M. A. O. M; FROTA, M. N. Wall effects for a sphere falling in a non-newtonian fluid. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, ABCM, Rio de Janeiro, 2001.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2°. ed. Paraíba: Interciência, 2001.

VASQUES, C. T. **Reologia do suco de goiaba: efeito da diluição e do tamanho de partícula.** Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

VIDAL, J. R. M. B. **Comportamento reológico da polpa de manga.** Tese (Doutorado). - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2000.

WADDEL, H. **The coefficient of resistance as a function of Reynolds number for solids of various shapes.** J. Franklin Inst., 1934.

WALKER, R. E. and MAYES, T. M. Design of muds for carrying capacity, **Journal of Petroleum Technology**, p. 893. Jul., 1975.