

2 Revisão Bibliográfica

O problema do transporte hidráulico de partículas sólidas por fluidos é tema de interesse de diversas áreas industriais, tais como: petróleo, mineração, dragagem, etc.

Basicamente, os sólidos por serem mais densos que o fluido que os arrasta, tendem a ser transportados com uma velocidade inferior à velocidade média do fluido. Para dutos verticais, o problema pode ser caracterizado por uma velocidade de transporte da partícula (V_t), definida pela diferença entre a velocidade do fluido (V_m) e a velocidade de sedimentação do sólido (V_s), como mostrado na Figura 2.1. Deste modo, se a velocidade de sedimentação da partícula for maior que a do fluido ela tende a sedimentar, caso contrário é transportada por este.

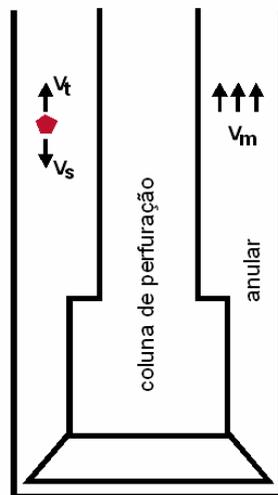


Figura 2.1 – Transporte de sólidos em trechos verticais.

Alguns autores definem a *razão de transporte* como sendo a relação entre a velocidade de transporte da partícula e a velocidade do fluido^{***}. Assim, o

^{***} No caso de perfuração de poços de petróleo, a velocidade de referência é a velocidade média na seção anular do poço.

transporte em anulares verticais é plenamente caracterizado pelo fenômeno de sedimentação.

Para 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 mostrado na Figura 2.2. Deste modo, a força gravitacional decomposta em duas componentes ortogonais gera uma força na direção do escoamento e outra na direção perpendicular ao eixo do poço. A primeira componente tende a atrasar a ascensão das partículas em suspensão, enquanto que a segunda empurra os sólidos na direção da parede inferior do poço, tendendo a formar um leito.

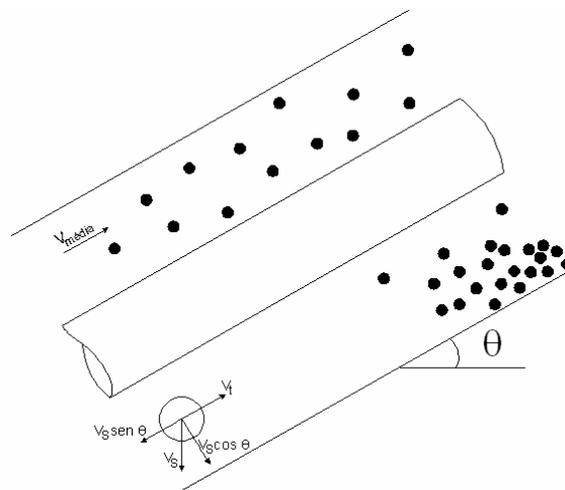


Figura 2.2 – Transporte de sólidos em trechos inclinados e horizontais

Desta forma, 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.

Define-se ainda uma razão de transporte generalizada como uma relação entre as concentrações de sólidos no anular e na alimentação (provenientes da taxa de penetração e da vazão de bombeio), ponderados pela área aberta ao fluxo.

A concentração de sólidos no anular, por sua vez, impacta a densidade média do sistema fluido-sólido que preenche o espaço anular. Assim, o

carreamento de sólidos no anular afeta diretamente os termos de pressão hidrostática e de perda de carga.

2.1. Limpeza de poços de petróleo

Durante o processo de perfuração de poços de petróleo são gerados, sedimentos provenientes do corte da formação. Estes sedimentos, conhecidos como cascalhos, precisam ser removidos para fora do poço. A operação de remoção dos cascalhos gerados pela broca através do fluido de perfuração é conhecida como limpeza de poço. Nesta operação faz-se circular através do espaço anular, formado pela coluna de perfuração e o revestimento, um fluido de perfuração com vazão suficiente para transportar os sólidos gerados pela broca para a superfície. A Figura 2.3 apresenta os esquemas do processo de limpeza de poço, onde o fluido de perfuração entra pela coluna e retorna, carreando os cascalhos através do espaço anular.

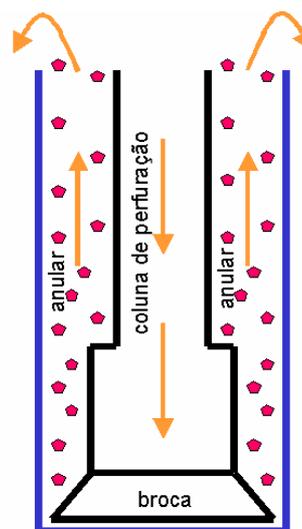


Figura 2.3 – Esquema do processo de carreamento de cascalhos.

Em poços inclinados e de grande afastamento (com relação à vertical) uma atenção maior deve ser dada ao mecanismo de transporte de sólidos pelo fluido de perfuração. Neste caso, no trecho de alta inclinação existe uma 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. Quando ocupa grande parte do espaço anular, o leito é responsável por diversos problemas causados na perfuração, incluindo:

- Redução da taxa de penetração;
- Desgaste prematuro da broca;
- Perda de circulação;
- Obstrução do anular;
- Prisão da coluna de perfuração;
- Fraturamento da formação;
- Torque excessivo na coluna de perfuração;
- Arrastes.

2.2.

Principais fatores que influenciam na limpeza de poço

Existem vários fatores que impactam na limpeza do poço durante a perfuração direcional. Várias análises de sensibilidade foram realizadas ao longo dos anos por diversos pesquisadores com o intuito de determinar os parâmetros mais relevantes em uma análise de limpeza de poços, como por exemplo: Jefferson e Zamorra (1995) Azar e Sanchez (1997), Li e Walker (1999) e Kelessidis e Mpandelis (2003).

Segundo esses autores, os mais relevantes, são: a velocidade média do fluido no anular, a rotação da coluna de perfuração, o ângulo de inclinação do poço, as propriedades do fluido, o tamanho e forma das partículas, a excentricidade da coluna de perfuração e a taxa de penetração. Estes efeitos são apresentados e discutidos a seguir,

2.2.1.

Velocidade média do fluido no anular

Sem levar em consideração os demais fatores que afetam a limpeza do poço, a velocidade média do fluido no anular domina o processo de transporte de cascalhos. É esperado que um aumento na vazão provoque uma remoção mais eficiente de sólidos no espaço anular. No entanto, existe um limite operacional superior para a vazão determinado pelos seguintes fatores;

- Potência do equipamento hidráulico;

- Densidade equivalente de circulação (ECD)* permitida;
- Susceptibilidade à erosão da seção aberta do poço.

2.2.2.

Velocidade de sedimentação das partículas

Devido à diferença de densidade, uma partícula sólida imersa em um fluido tende a sedimentar à uma velocidade constante, conhecida por velocidade terminal de sedimentação.

A velocidade de sedimentação de qualquer partícula depende de sua densidade, tamanho e geometria, e das propriedades do fluido. Para uma partícula com características definidas, as propriedades reológicas e a densidade do fluido são as variáveis que mais afetam a velocidade de sedimentação ou de queda de partícula. Considerando que estas variáveis atuam simultaneamente, a avaliação da capacidade de carregamento de um fluido torna-se um problema extremamente complexo.

Enquanto o fluido se encontra em fluxo laminar, a velocidade de sedimentação dos sólidos é afetada diretamente pelas características viscosas do fluido. Deste modo, quando a velocidade de fluxo do fluido no espaço anular está limitada pela vazão da bomba ou por seções alargadas do poço, é necessário torná-lo mais viscoso para reduzir a velocidade de queda dos sólidos e, como conseqüência, aumentar a eficiência da limpeza do poço.

Uma partícula em queda não acelerada no interior de um fluido está sujeita à ação de três forças: uma descendente devido à gravidade, isto é, o peso da partícula (P) e outra ascendente, devido ao empuxo (E) e a terceira devido ao arraste (F_D). Este esquema de forças é apresentado na Figura 2.4.

*ECD – *equivalent circulating density* – é a densidade de um fluido em repouso que exerce no fundo do poço uma pressão hidrostática igual à pressão atuante.

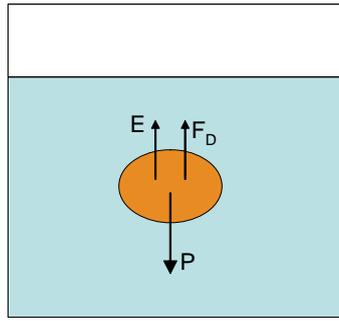


Figura 2.4 – Esquema de forças atuando em uma partícula em sedimentação no interior de um fluido.

Onde as forças atuantes são definidas a seguir,

$$P = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} g \quad (2.1)$$

$$E = \rho_f \frac{\pi d_p^3}{6} g \quad (2.2)$$

$$F_D = C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \frac{1}{2} \rho_f v_{sp}^2 \quad (2.3)$$

A partir da definição das forças acima, tem-se a seguinte correlação para a velocidade de sedimentação de uma partícula,

$$u_{sp} = \left[\frac{4(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f} \left(\frac{d_p g}{C_D} \right) \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

Onde C_D é o coeficiente de arraste, d_p é o diâmetro da partícula, ρ_p é a densidade da partícula e ρ_f é a densidade do fluido.

Vários esforços foram realizados para prever correlações, para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos para o coeficiente de arraste e, a partir destes, prever a velocidade de sedimentação. A Tabela 2.1 apresenta correlações para a determinação do coeficiente de arraste propostos por diversos autores e para fluidos Newtonianos e a Tabela 2.2 para fluidos não-Newtonianos.

Para os fluidos Newtonianos, o número de Reynolds da partícula é definido pela seguinte relação,

$$\text{Re} = \frac{\rho_f u_{sp} d_p}{\mu} \quad (2.5)$$

onde u_{sp} é a velocidade de sedimentação da partícula e μ é a viscosidade do fluido.

Tabela 2.1 – Correlações para determinação do coeficiente de arraste das partículas para fluidos Newtonianos.

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

Tabela 2.2 – Correlações para determinação do coeficiente de arraste das partículas para fluidos não-Newtonianos (Modelo de Potência).

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

Onde K representa o índice de consistência e n o índice de comportamento do fluido de potência.

2.2.3. Rotação da coluna de perfuração

A rotação da coluna de perfuração possui um efeito entre moderado e significativo na limpeza de poços direcionais. A taxa de aumento de remoção de cascalhos devido à rotação da coluna de perfuração é função da combinação da reologia do fluido, tamanho dos cascalhos, vazão e comportamento dinâmico da coluna. Acredita-se que o movimento de rotação da coluna de perfuração seja o que mais contribui no processo de limpeza. A agitação mecânica do leito de cascalhos, e sua exposição a altas velocidades de fluido, beneficiam este movimento.

Embora haja um ganho na limpeza do poço devido à rotação da coluna, deve-se reconhecer que existem também, limitações que precisam ser impostas ao poço. Como exemplo, a rotação da coluna induz tensões cíclicas que podem acelerar a ruptura do tubo devido à fadiga, causando excessivos desgastes no revestimento e em alguns casos, destruição mecânica da parede do poço aberto. Adicionalmente, em poços delgados (diâmetros inferiores a 6"), altas rotações da coluna podem causar um aumento da perda de carga devido ao atrito no anular e, assim, um aumento no ECD.

2.2.4. Ângulo de inclinação do poço

À medida que o ângulo de inclinação (com a vertical) do poço aumenta, a limpeza torna-se mais difícil e os esforços hidráulicos aumentam significativamente. Embora a inclinação cause dificuldades na limpeza, esta escolha é comandada pelas condições geológicas e pelos objetivos de desenvolvimento do campo.

2.2.5. Propriedades do fluido

O fluido de perfuração tem um impacto significativo na limpeza de poços, mas o seu projeto leva em consideração as demais funções do fluido além do carreamento dos cascalhos, dentre as quais podemos destacar:

- Limpeza do fundo do poço e do espaço anular;
- Estabilidade mecânica e química do poço;
- Resfriamento e lubrificação da coluna de perfuração e da broca;
- Prevenção da invasão da formação para dentro do poço durante a perfuração convencional.

Dentre as muitas propriedades de um fluido de perfuração, as que possuem um maior impacto na limpeza do anular são a viscosidade e a densidade.

A densidade do fluido é responsável por estabilizar o poço mecanicamente e prevenir a entrada de fluidos da formação para dentro do poço. Aumentando a densidade aumenta a suspensão de cascalhos e, conseqüentemente, o seu transporte. Porém, um aumento na densidade causa uma diminuição na taxa de penetração, o que pode gerar altos custos de perfuração. Adicionalmente, a estabilidade mecânica do poço é dependente da combinação das tensões *in-situ* na rocha e da densidade do fluido e, portanto, sua magnitude é ditada pelas funções principais do fluido de perfuração, que não é a limpeza do poço.

Um outro aspecto importante da densidade do fluido é a sua influência na velocidade de sedimentação da partícula. A influência deste efeito pode ser observada na Figura 2.5, que mostra a tendência de diminuição da velocidade de queda com o aumento da densidade do fluido.

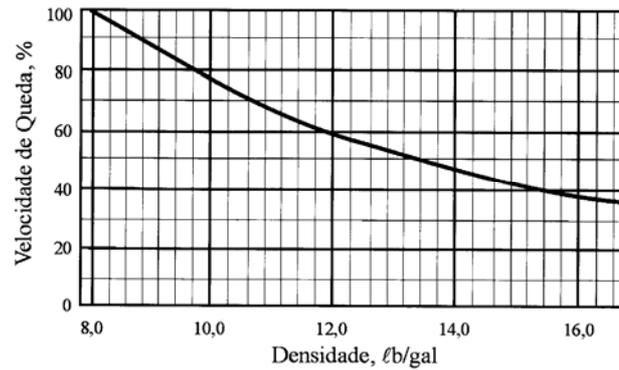


Figura 2.5 – Variação de velocidade de queda das partículas em função da densidade (Machado, 2001).

Entretanto, um aumento da densidade do fluido não é uma solução viável para melhorar a capacidade de carregamento dos sólidos. Isto porque os seguintes problemas indesejáveis podem ocorrer com este aumento:

- Indução à fratura das formações, com conseqüente perda de circulação do fluido;
- Aumento da possibilidade de prisão da coluna por pressão diferencial;
- Redução da taxa de penetração da broca, durante a operação de perfuração;

Já a viscosidade do fluido permite a suspensão de materiais no sistema fluido e controla a quantidade de perda para dentro da zona permeável. Geralmente, um aumento na viscosidade diminui a limpeza do poço em perfurações direcionais. De fato, água pura seria mais eficiente em limpeza de poços direcionais devido à baixa vazão requerida para induzir uma condição de fluxo turbulento no anular, que é mais eficiente na limpeza de poços.

Devido aos fatores citados, torna-se de extrema importância a escolha adequada do fluido de perfuração. Assim, um fluido deve possuir alta viscosidade para baixas taxas de cisalhamento para promover um melhor carregamento dos sólidos, e baixa viscosidade, para altas taxas de cisalhamento, para uma melhor ressuspensão dos sólidos.

2.2.6. Tamanho e forma das partículas

O tamanho, forma e a densidade relativa das partículas afetam o comportamento dinâmico em um meio fluido. A densidade relativa da maioria das rochas perfuradas está na média de 2,6 e, portanto, pode ser admitida como sendo conhecida. O tamanho e a forma das partículas são funções do tipo de broca utilizada. No entanto, é impossível controlar o tamanho e a forma, mesmo se a broca correta tiver sido selecionada para gerar uma geometria específica.

2.2.7. Excentricidade do anular

A posição da coluna de perfuração na parte inclinada do poço possui um efeito importante na eficiência do fluido de perfuração em remover as partículas do espaço anular. Devido à gravidade, a coluna possui a tendência de se localizar na parte inferior do poço. Infelizmente, esta é a pior posição (excentricidade positiva), porque causa baixas velocidades de fluido no intervalo abaixo da coluna, onde estão a maior parte dos cascalhos, e altas velocidades do fluido no espaço acima da coluna. Uma vez que a excentricidade da coluna é governada pela trajetória pré-selecionada do poço, e pelo comportamento dinâmico da coluna de perfuração, este impacto adverso é inevitável. A Figura 2.6 mostra os tipos de excentricidade.

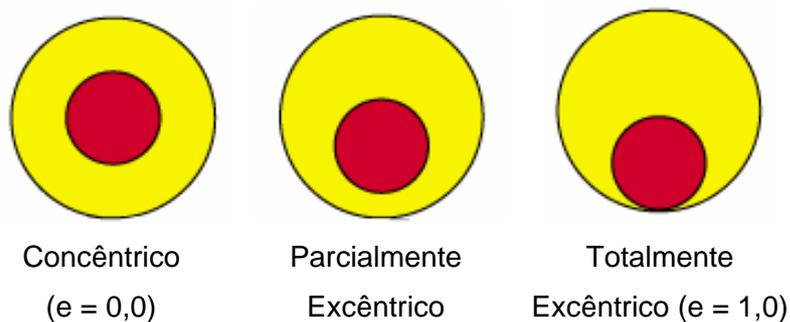


Figura 2.6 – Tipos de excentricidade da coluna de perfuração.

2.2.8. Taxa de penetração

Sob iguais condições, um aumento na taxa de penetração causa um aumento na concentração de sólidos no anular. No entanto, para manter uma

limpeza de poço aceitável e efetiva, outras variáveis controláveis como a hidráulica e a velocidade de rotação precisam ser ajustadas. Se o limite destas variáveis tiver sido alcançado, então a alternativa é diminuir a taxa de penetração. Entretanto, uma diminuição da taxa de penetração terá um impacto negativo no custo do poço, mas os benefícios em evitar problemas de perfuração como a prisão da coluna, torque e arrastes excessivos devem contrabalançar estas perdas.

2.3. Modelo reológico

A relação entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento define o comportamento reológico dos fluidos. A equação matemática entre estas duas variáveis é conhecida como equação de fluxo, ou seja, esta equação define como a tensão cisalhante varia em função da taxa de cisalhamento.

Quando esta relação entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento é constante, este fluido é denominado Newtoniano. Caso contrário é classificado como não-Newtoniano. Neste trabalho será considerado que o fluido tem um comportamento não-Newtoniano e obedece ao modelo de Ostwald de Waale ou Modelo de Potência.

O Modelo de Potência não se aplica a todo e qualquer fluido, nem a todo intervalo de taxa de cisalhamento. No entanto existe um número razoável de fluidos não-Newtonianos que apresentam comportamento de Potência, num largo intervalo de velocidades cisalhantes.

O modelo de Potência é definido pela seguinte equação,

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.6)$$

onde τ é a tensão cisalhante do fluido, $\dot{\gamma}$ a taxa de cisalhamento, K e n são os parâmetros reológicos do modelo de Potência e representam, respectivamente, o índice de consistência e o índice de comportamento do fluido.

O índice de consistência do fluido, como o próprio nome diz, indica o grau de resistência do fluido diante do escoamento, ou seja, quanto maior o valor de K , mais “consistente” o fluido será. O índice de comportamento do fluido indica fisicamente o afastamento do fluido do modelo Newtoniano. Se o valor se

aproxima da unidade, então o fluido está próximo do comportamento Newtoniano.

2.4. Estudos sobre limpeza de poços

Okrajni e Azar (1986) apresentaram um importante estudo sobre transporte de cascalhos em poços direcionais, onde investigaram o efeito da reologia do fluido na limpeza de poços. O trabalho estabeleceu que o mecanismo de transporte de cascalhos e o comportamento do fluxo em poços altamente inclinados são totalmente diferentes do comportamento dos poços verticais. Foi observado que uma alta viscosidade do fluido, que para poços verticais melhora a remoção de cascalhos, pode ser prejudicial em poços altamente inclinados (considerando a não existência de rotação da coluna de perfuração), onde a baixa viscosidade pode promover um aumento da turbulência do fluido, particularmente útil para ajudar na limpeza de poços horizontais. Com base nesses resultados e em estudos prévios, os autores concluíram que a limpeza de poços é dependente do ângulo da inclinação do poço, de propriedades reológicas do fluido, da excentricidade da coluna de perfuração e da taxa de penetração.

Demais estudos nesta linha foram realizados para a determinação de parâmetros que influenciam a limpeza como, por exemplo: Peden et al (1990), Sanchez, Azar e Martins (1997), Li e Walker (1999), Walker e Li (2000), Saasen e Loklingholm (2002), Costa, S.S. *et al.* (2002).

Becker (1987) mostrou através de correlações desenvolvidas que a concentração volumétrica total era o parâmetro mais adequado para a avaliação da limpeza de poços, tendo em vista que a razão de transporte generalizada, que expressa a concentração de sólidos na área aberta ao escoamento (Iyoho, 1980), não considera a possibilidade de movimentos do leito de cascalhos. As correlações para a determinação da concentração volumétrica total levam em conta uma série de parâmetros como velocidade do fluido, ângulo de inclinação, reologia do fluido e geometria do anular.

Sifferman e Becker (1992) conduziram uma série de experimentos de limpeza de poço. Eles avaliaram o efeito de diversos parâmetros no transporte de cascalhos. Neste trabalho, os autores avaliaram que o efeito da rotação da coluna no transporte dos cascalhos depende também do tamanho dos cascalhos

e da reologia do fluido e que o efeito da rotação é mais pronunciado para partículas menores e fluidos mais viscosos.

Bassal (1995) realizou um estudo do efeito da rotação da coluna no transporte de cascalhos em poços inclinados. As variáveis consideradas foram: velocidade de rotação da coluna, inclinação do poço, reologia do fluido, tamanho das partículas e vazão do fluido. Os resultados mostraram que a rotação da coluna de perfuração possui um efeito significativo na limpeza de poços direcionais. O nível de melhora na remoção de partículas como resultado da velocidade de rotação da coluna de perfuração é função da combinação da reologia do fluido, tamanho das partículas, vazão do fluido e da maneira em que a coluna de perfuração se comporta dinamicamente. Geralmente, partículas pequenas são mais difíceis de transportar. Mas com alta velocidade de rotação da coluna de perfuração e alta viscosidade do fluido, as partículas pequenas tornam-se mais fáceis de serem transportadas. Concluiu ainda que, uma baixa viscosidade da lama possui um melhor efeito carreador que alta viscosidade, sem rotação da coluna de perfuração.

Martins e Santana (1992) previram que um aumento na vazão e na densidade do fluido eram as formas mais efetivas de reduzir a concentração de cascalhos. Concluíram também que os parâmetros reológicos possuem somente um efeito moderado, mas nenhuma comparação com dados experimentais foi realizada.

Kamp e Rivero (1999) propuseram um modelo de duas camadas, com anular excêntrico. Os autores utilizaram fluxo de massa dos cascalhos que são depositados, ou ressuspensos, equações de balanço de massa para os sólidos, líquido e para a mistura (três equações) e equações de momento para a camada heterogênea e para o leito (duas equações). Um sistema de cinco equações com cinco incógnitas: concentração de sólidos (C_s), velocidade da suspensão (U_s), velocidade do leito (U_L), perda de carga (p) e altura do leito (h) foi obtido. A concentração de sólidos no leito foi considerada uniforme e igual a $C_L = 0,52$.

Os resultados de Kamp e Rivero (1999) mostraram que a altura do leito decresce quando a vazão aumenta, mas a razão de decréscimo foi muito menor para altas vazões, contrariando o que eles esperavam. Os resultados não foram muito sensíveis à viscosidade do fluido, em contraste com evidências experimentais e de campo que mostram que a turbulência promove o transporte de cascalhos. Não houve comparação com resultados experimentais. As previsões mostraram tendências similares para as correlações dos modelos

utilizados, mas não apresentaram relações quantitativas. Os autores ressaltam a necessidade de utilização de boas relações correlacionando a ressuspensão dos sólidos com a velocidade de sedimentação das partículas.

Tomren *et al.* (1986), produziram mapas de regime de fluxo que mostram como a vazão mínima para uma suspensão, varia com a viscosidade do fluido e concentração da partícula. Concluíram ainda que fluidos de viscosidades moderadas são mais eficientes que os de baixa viscosidade para a remoção de cascalhos. Walton (1995) compara seus resultados de simulação (usando água) com os dados de Tomren *et al.* (1986), com rotação da coluna de 50 rpm. A simulação apresenta apenas uma determinada tendência de comportamento dos dados.

Pilehvari *et al.*(1996) declararam que a velocidade do fluido deve ser maximizada para alcançar um fluxo turbulento e a reologia do fluido precisa ser otimizada para aumentar a turbulência em seções inclinadas e horizontais do poço. O fluxo turbulento em fluidos não-Newtonianos necessita de muito mais potência da bomba e deve-se levar em consideração a rotação da coluna para a perfuração convencional para auxiliar na indução da turbulência.

Li e Walker (1999) apresentaram resultados de seus estudos experimentais utilizando várias correlações empíricas, desenvolvidos através de seus próprios dados e dados de outros pesquisadores. Uma das principais correlações utilizadas estabelece que a erosão obedece a uma expressão logarítmica com o tempo. Foi desenvolvido um modelo computacional baseado em análises dimensionais e usando as correlações desenvolvidas. Foi estudada a sensibilidade das previsões sobre vários parâmetros importantes. Encontrou-se que a variável mais importante é a velocidade do líquido, embora nenhum dado quantitativo tenha sido indicado no trabalho. Mais tarde, os autores estenderam seus estudos (Li e Walker, 2001) para avaliar os efeitos do diâmetro médio da partícula, da reologia do fluido e da excentricidade. Concluíram que a reologia do fluido possui uma função significativa com fluidos de baixa viscosidade e em fluxo turbulento, dando ótimos resultados para a limpeza de poço, similar aos resultados de Walton (1995). Também encontraram que a velocidade crítica para suspensão total é maior para anulares totalmente excêntricos, comparado aos anulares concêntricos.

2.5. Padrões de fluxo

Durante o fluxo de sólido e líquido em dutos, as fases líquidas e o sólidas podem estar distribuídas em diferentes configurações dependendo da vazão do fluido, forma, tamanho e inclinação do duto, propriedades do sólido e do líquido.

Os principais parâmetros para determinar a distribuição de sólidos no líquido, ou seja, o padrão de fluxo, são a velocidade do fluido (dada pela vazão do fluido e a seção transversal do duto), a quantidade de sólidos e as propriedades dos sólidos e do fluido. Com base nestes parâmetros podem ser identificados quatro padrões para caracterizar o escoamento do fluido de acordo com a velocidade da suspensão e do tamanho da partícula, como pode ser observado na Figura 2.7. Os padrões são descritos a seguir.

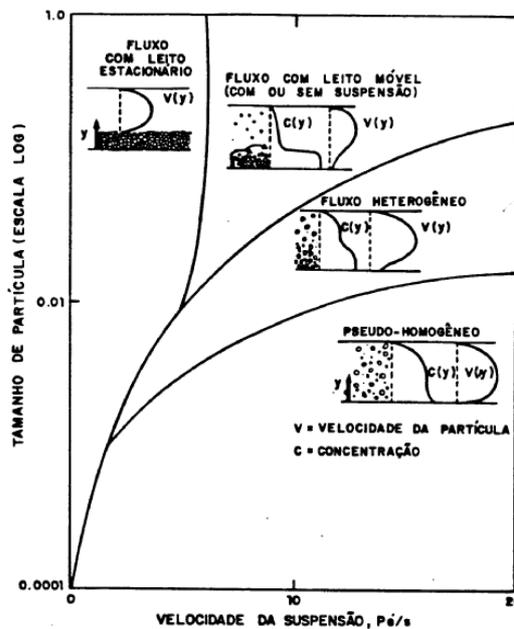


Figura 2.7 – Mapa de padrões para o escoamento sólido-líquido.

2.5.1. Fluxo pseudo-homogêneo

Sob altas velocidades do fluido, o sólido pode estar quase uniformemente distribuído no líquido e a hipótese aceita é considerar que não existe escorregamento entre as duas fases; isto é, a velocidade dos sólidos é igual à velocidade do líquido. Este padrão de fluxo é chamado de padrão de fluxo *simétrico, totalmente suspenso, ou pseudo-homogêneo*. (Figura 2.8)

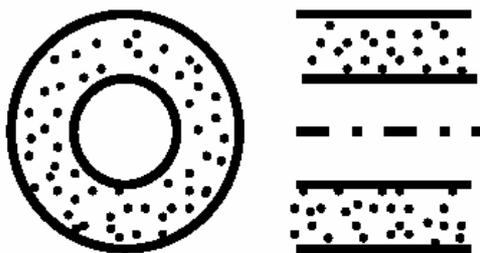


Figura 2.8 – Esquema do Fluxo Pseudo Homogêneo.

2.5.2. Fluxo heterogêneo

Quando a vazão de fluido é reduzida, existe uma tendência para os sólidos se deslocarem próximo do fundo do tubo, mas ainda em suspensão, criando, assim, uma concentração de sólidos assimétrica (não homogênea). Isto é denominado de padrão de *fluxo assimétrico*, mas com os sólidos ainda se movimentando com o líquido. (Figura 2.9)

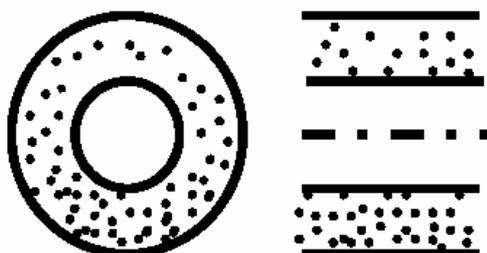


Figura 2.9 – Esquema do Fluxo Heterogêneo.

2.5.3. Fluxo com leito móvel

Mais uma redução na vazão do fluido, resulta na deposição de partículas sólidas no fundo do tubo. Os sólidos começam a formar um leito que se move na direção do fluxo, enquanto podem existir alguns sólidos na camada acima, distribuídos de uma maneira não-uniforme. A velocidade inferior costuma receber diferentes nomes como, velocidade de depósito limite, velocidade de suspensão, velocidade crítica. (Figura 2.10).

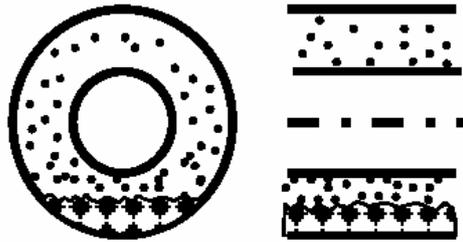


Figura 2.10 – Esquema do Fluxo com Leito Móvel.

2.5.4. Fluxo com leito estacionário

Continuando a redução da velocidade de fluxo (ou vazão e aumentando a seção transversal ao fluxo) resulta num acúmulo de sólidos depositados. Tem-se agora um leito de sólidos que não se move, formando um *leito estacionário*. (Figura 2.11).

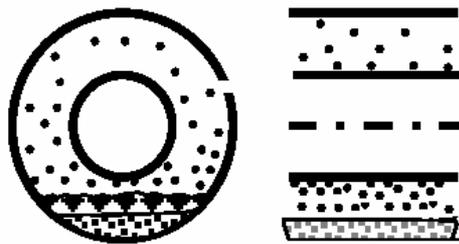


Figura 2.11 – Esquema do Fluxo com Leito Estacionário.

2.6. Modelos de carregamento de sólidos em regime permanente

As aproximações consideradas por vários pesquisadores na modelagem do transporte de sedimentos em anulares de poços inclinados e horizontais (sem rotação da coluna) é a de duas ou três camadas.

Iyoho (1980) apresentou um modelo que considera um meio estratificado, de duas camadas, baseado em correlações semi-empíricas para avaliar o problema de carregamento de cascalhos em poços inclinados. Uma grande contribuição deste trabalho foi a introdução do conceito de razão de transporte generalizada como um dos parâmetros de avaliação da limpeza de poços. Este conceito expressa a concentração de sólidos na área aberta ao escoamento. Foram definidos como principais parâmetros para a determinação da razão de transporte generalizado (RTG), o regime de escoamento e a inclinação do poço.

Gavignet e Sobey (1986) apresentaram um modelo estratificado de duas camadas para descrever a formação de leito de cascalhos na parte inferior do anular excêntrico. Este modelo mostrou que a espessura do leito é controlada pelas tensões interfaciais causadas pelas diferentes velocidades do fluido e do leito de sólidos. Os autores apresentaram curvas para previsão de concentração volumétrica de sólidos e vazão crítica de deposição em função de diversas variáveis operacionais.

Uma desvantagem apresentada pelo modelo de Gavignet e Sobey é que a camada superior contém apenas fluido carreador, sem qualquer partícula em suspensão. Desta forma, não é um modelo muito realista para a simulação de carregamento de sólidos durante a perfuração.

Martins e Santana (1992) apresentaram um modelo de duas camadas baseado no modelo de Gavignet e Sobey (1986), porém mais versátil, uma vez que admite que partículas estejam em suspensão na camada superior. A concentração média de partículas na camada superior é calculada a partir de um perfil de concentrações obtido através da solução da equação da difusão. Esta aproximação foi baseada no trabalho de Doron *et al.* (1987). Posteriormente, Santana *et al.* (1998) estenderam o modelo de Martins e Santana (1992) introduzindo o escorregamento entre o líquido e as partículas sólidas no leito, como feito por Doron e Barnea (1992) para tubos e encontrou um efeito desprezível nas previsões finais; ou seja, a consideração de não haver deslocamento relativo entre as camadas era aceitável. Além disso, examinaram a influência do uso de diversos modelos reológicos. Os autores utilizaram cinco modelos reológicos diferentes: Bingham-Plastic (dois parâmetros), Power-Law (dois parâmetros), Robertson & Stiff (três parâmetros), Casson (dois parâmetros) e Herschel-Bulkley (três parâmetros). Os resultados das simulações foram diferentes, enfatizando a importância da reologia do fluido na previsão da eficiência do transporte de cascalhos.

Larsen *et al.* (1993) desenvolveram um modelo para poços inclinados de 50 a 90 graus em relação à vertical. Foram desenvolvidas correlações empíricas após executar um extensivo estudo experimental de transporte de cascalhos em um *flow-loop**. O modelo prevê a velocidade crítica do fluido, a velocidade

* Instrumento de laboratório para verificar as características do fluxo em tubos e para estudar a resposta dos equipamentos de perfuração a este fluxo. As propriedades do fluido, *holdups* (fração de um fluido particular presente em um intervalo do tubo) e velocidades podem ser

média de transporte do cascalho, a concentração de cascalhos no anular sob diversos conjuntos de condições de perfuração, e também a espessura do leito quando a vazão está abaixo da crítica.

Clark e Bickham (1994) apresentaram um modelo de transporte de cascalhos baseados em relações de mecânica de fluidos, onde são admitidos três modelos de transporte de cascalhos: sedimentação, elevação e rolamento, cada um dominante em um certo intervalo de variação de inclinação do poço. Para ângulos de inclinação altos com relação à vertical, onde existe a possibilidade de formação de um leito estacionário, o transporte se dá através do mecanismo de rolamento. Para inclinações intermediárias, onde um leito turbulento pode ser formado, o transporte se dá através do mecanismo de elevação. Para inclinações próximas da vertical, a sedimentação das partículas determina o transporte.

O mecanismo de rolamento se dá quando as forças dinâmicas atuantes na partícula excedem as forças estáticas e as partículas tendem a rolar ao longo do leito. Estas forças dinâmicas tendem a crescer com o aumento da velocidade do fluido de perfuração.

No mecanismo de elevação (*lifting*), os cascalhos começam a se movimentar na direção perpendicular ao leito. Eles irão se mover para cima, na região onde a velocidade axial do fluido carrega os cascalhos na direção do fluxo.

No mecanismo de assentamento, tem-se que a velocidade do fluido no anular deve exceder a velocidade de sedimentação dos cascalhos na direção axial.

Campos *et al.* (1994) desenvolveram um modelo mecanicista para prever a velocidade crítica, assim como o leito de cascalhos para condições subcríticas de fluxo. O trabalho foi baseado em um estudo anterior de Oroskar e Whitmore (1980) para transporte de lama em dutos. As previsões do modelo são boas para fluidos de baixa viscosidade, embora requeira mais trabalho para considerar fluidos com viscosidades mais elevada e rotação da coluna.

Um modelo de duas camadas foi também usado por Doan et al (2000) para perfurações sub-balanceadas sob condições transientes. Neste caso, a mistura bifásica (gás-líquido) na camada em suspensão é considerada como pseudo-homogêneo, com propriedades fixas. Também consideraram fluxo

variadas. Os *Flow-loops* são essenciais para o estudo de fluxo multifásico e para o desenvolvimento de novos equipamentos de medição.

depositado, derivado da sedimentação dos sólidos, e fluxo de erosão (ou ressuspensão), como função da velocidade de cisalhamento interfacial, de uma maneira similar a proposta por Kamp e Rivero (1999) Foi considerado o escorregamento entre as partículas e o fluido, ambos na camada em suspensão e no leito, e considerado um comportamento não-Newtoniano para o fluido.

Os resultados (realizados para água e lama somente, sem a fase gasosa), mostraram que para o padrão de fluxo suspenso, a velocidade dos sólidos é compatível com a do líquido, ou seja, não existe deslizamento entre as duas fases. Porém, quando um leito é formado, então os sólidos movem-se na suspensão a velocidades muito baixas (da ordem da metade) da velocidade do líquido.

A seguir são apresentados, em detalhes o modelo de duas camadas e o de três camadas para regime permanente. São apresentadas as hipóteses, as principais características dos modelos e as equações que governam o problema.

2.6.1. Modelo de duas camadas

O modelo de duas camadas é mecanicista e tem como objetivo descrever o fenômeno em questão. Este modelo é baseado nas leis de conservação e nas equações constitutivas que caracterizam o sistema bifásico. Este modelo permite também caracterizar o sistema dentro dos padrões de fluxo já apresentados (leito estacionário, leito móvel, suspensão heterogênea e suspensão homogênea). A Figura 2.12 mostra as duas camadas, onde a inferior representa o leito de sólidos depositado na seção do anular por efeito gravitacional. A camada superior representa o fluido de perfuração e as partículas de sólidos em suspensão.

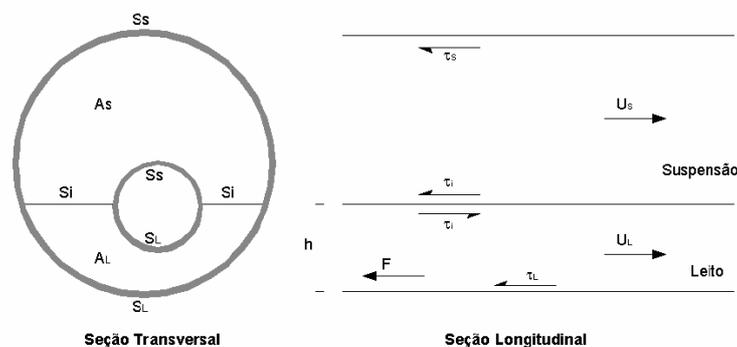


Figura 2.12 – Esquema do modelo de duas camadas.

As principais hipóteses utilizadas para este modelo são:

- Altura do leito constante no trecho;
- Distribuição hidrostática de pressões ao longo de uma seção transversal;
- Sistema sólido-líquido considerado incompressível e de parâmetros reológicos constantes e iguais aos do fluido;
- Sólidos caracterizados por um diâmetro médio e uma esfericidade;
- Desconsiderados efeitos de tensão superficial e de transferência de massa entre as fases sólida e líquida;
- Não escorregamento entre as fases líquida e sólida em cada uma das regiões.

Os mecanismos considerados na modelagem da limpeza de poços, através do modelo de duas camadas podem ser descritos pelas equações de conservação de massa e quantidade de movimento.

- Conservação de massa

São consideradas duas equações: uma para a camada inferior (leito) e outra para a camada superior (suspensão), ou seja,

$$U_L A_L C_L + U_S A_S C_S = U_M A_T C_M \quad (2.7)$$

$$U_L A_L (1 - C_L) + U_S A_S (1 - C_S) = U_M A_T (1 - C_M) \quad (2.8)$$

Onde U_i representam as velocidades; A_i as áreas; C_i as concentração e i pode ser leito, suspensão e mistura.

- Conservação de quantidade de movimento

De forma análoga, são consideradas duas equações: uma para a camada inferior e outra para a camada superior:

$$-A_s \frac{dP}{dz} = -\tau_s S_s - \tau_i S_i \quad (2.9)$$

$$-A_L \frac{dP}{dz} = -F - \tau_L S_L - \tau_i S_i \quad (2.10)$$

Onde F representa a força estática decorrente do contato entre as partículas do leito e as paredes do anular, τ_L a tensão cisalhante entre o leito e a parede, τ_i a tensão cisalhante entre as camadas, S_L e S_i os perímetros das regiões 1 e da interface, respectivamente.

As relações constitutivas para as tensões cisalhantes (τ) são,

$$\tau_s = \frac{1}{2} \cdot f_s \cdot \rho_s \cdot U_s^2 \quad (2.11)$$

$$\tau_L = \frac{1}{2} \cdot f_L \cdot \rho_L \cdot U_L^2 \quad (2.12)$$

$$\tau_i = \frac{1}{2} \cdot f_i \cdot \rho_s \cdot (U_s - U_L)^2 \quad (2.13)$$

Onde f_s , f_L e f_i são os fatores de atrito da suspensão, do leito e da interface, respectivamente.

- Equação da difusão turbulenta

A equação da difusão turbulenta é utilizada para a determinação do perfil de concentração de sólidos em suspensão na camada superior. Admite-se que este mecanismo é governado pela equação de difusão;

$$\varepsilon \frac{\partial^2 C(y)}{\partial y^2} + u_{sp} \frac{\partial C(y)}{\partial y} = 0 \quad (2.14)$$

onde ε representa o coeficiente de difusão médio na seção e u_{sp} a velocidade local de sedimentação da partícula.

Ghandi (1976) apresenta como solução da equação (2.14) o seguinte perfil de concentração (considerando um duto inclinado e coeficiente de difusão médio),

$$C_s(y) = C_L \exp\left(-\frac{u_{sp}}{\varepsilon}(y-h)\text{sen}\theta\right) \quad (2.15)$$

onde y e h são medidos em relação à parede inferior do duto e o coeficiente de difusão, é dado por (Taylor, 1954):

$$\varepsilon = 0,013 \cdot u_s \sqrt{\frac{f_i}{2}} \cdot D \quad (2.16)$$

onde f_i representa o fator de atrito de Fanning da interface entre as camadas, D é o diâmetro hidráulico da suspensão e u_s é a velocidade média na suspensão.

Admitimos que a velocidade de sedimentação de partículas não esféricas em fluidos não-Newtonianos pode se calculada pela metodologia proposta por Laruccia (1990):

$$u_{sp_0} = \left\{ \left(\frac{4 g \cdot d_p \cdot (\rho_p - \rho_f)}{3 \rho_f \cdot X(\phi')} \right)^m - \left(\frac{24 \cdot \tau(\dot{\gamma})}{\rho_f} \alpha(\phi') \right)^m \right\}^{\frac{1}{2m}} \quad (2.17)$$

onde $\tau(\dot{\gamma})$ representa a tensão cisalhante do fluido, os demais parâmetros são definidos a seguir,

$$X(\phi') = 108,7^{-5,53 \cdot \phi'} \quad (2.18)$$

$$m(\phi') = 2,29 - 0,83 \cdot \phi' \quad (2.19)$$

$$\alpha(\phi') = \frac{(0,65 \cdot \phi' - 1,65) \cdot \exp(5,53 \cdot \phi')}{(3,45 \cdot \phi'^2 - 5,25 \cdot \phi' + 1,41) \cdot 108,7} \quad (2.20)$$

e onde ϕ' representa a esfericidade* da partícula.

O efeito da população, que considera o efeito de uma partícula exercendo uma força de arraste sobre outras partículas vizinhas, pode ser considerado utilizando-se a correlação proposta por Richardson e Zaki (1954):

$$\frac{u_{sp}}{u_{sp0}} = (1 - C_s)^m \quad (2.21)$$

onde

$$m = 4,45 \cdot \text{Re}^{-0,1} \quad \text{para} \quad \text{Re} < 500 \quad (2.22)$$

$$m = 2,39 \quad \text{para} \quad \text{Re} > 500 \quad (2.23)$$

e Re é o número de Reynolds da partícula $\left(\text{Re}_p = \frac{u_{sp} d_p \rho_l}{\mu} \right)$

Assim, o valor médio para a concentração $C_s(y)$ na seção correspondente à suspensão é obtido a partir da integração da equação (2.15); dividindo pela área. A integração fornece o seguinte resultado,

$$C_s = \frac{C_L D_e^2}{2A_s} \int_{\theta_b}^{\pi/2} M \exp\left(-\frac{u_{sp} D_e}{2\varepsilon} (\text{sen}\gamma - \text{sen}\theta_b) \text{sen}\theta\right) \cos^2 \gamma \cdot d\gamma \quad (2.24)$$

onde M é um parâmetro que leva em consideração o efeito da presença do tubo interno e é igual a 1 para as regiões I e III do anular e $(1 - k^2)$ para a região II do anular, de acordo com a Figura 2.14. A constante k é a razão de diâmetros, isto é, $k = \frac{D_i}{D_e}$, θ_b é o ângulo descrito na Figura 2.13, C_L é a concentração de sólidos no leito, D_e é o diâmetro externo do anular e A_s a área região da suspensão,

* razão entre as áreas da superfície da partícula e a da superfície da esfera com o mesmo volume

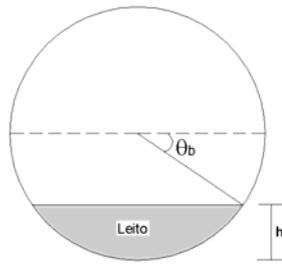
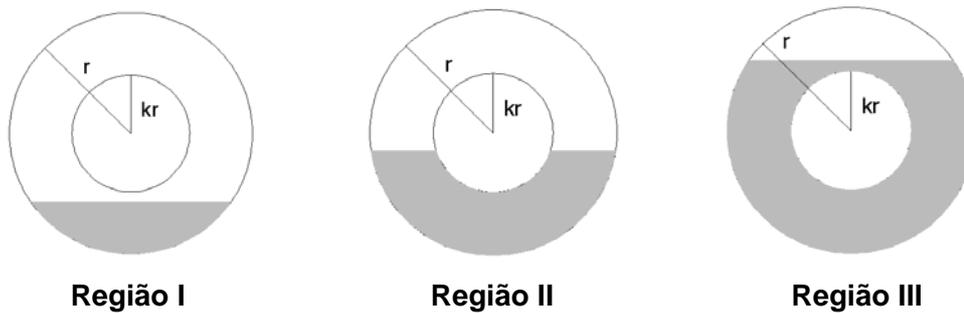
Figura 2.13 – Ângulo θ_b .

Figura 2.14 – Regiões do anular.

2.6.1.1.

Determinação do fator de atrito

O fator de atrito é um parâmetro fundamental para a determinação das perdas de carga, mas existem poucas correlações na literatura para a sua determinação. São apresentadas a seguir algumas correlações presentes na literatura.

Doron *et al.* (1987) e Walton (1995) utilizaram as seguintes relações para o fator de atrito para fluidos Newtonianos:

$$f_s = \alpha_s \left(\frac{\rho_s U_s D_s}{\mu_s} \right)^{-\beta_s} \quad (2.25)$$

$$f_L = \alpha_L \left(\frac{\rho_L U_L D_L}{\mu_L} \right)^{-\beta_L} \quad (2.26)$$

$$D_s = \frac{4A_s}{S_s + S_i} \quad (2.27)$$

$$D_L = \frac{4A_L}{S_L + S_i} \quad (2.28)$$

onde f_s e f_L são, respectivamente o fator de atrito para a suspensão e para o leito, D_s e D_L os diâmetros hidráulicos da suspensão e do leito, ρ_s e ρ_L as densidades as suspensão e do leito.

Os seguintes coeficientes foram utilizados: $\alpha_s = \alpha_B = 0,046$, $\beta_s = \beta_L = 0,2$ para fluxo turbulento e $\alpha_s = \alpha_L = 16$, $\beta_s = \beta_L = 1,0$ para fluxo laminar. Observe, no entanto que nesta configuração de fluxo, o fluxo laminar na camada superior nunca é encontrado. Desta forma define-se:

a) Para fluxo turbulento

$$f_s = \frac{0,046}{N_{Re,S}^{0,2}} \quad (2.29)$$

b) Para fluxo laminar

$$f_L = \frac{16}{N_{Re,L}} \quad (2.30)$$

onde,

$$\rho_s = \rho_p C_s + \rho(1 - C_s) \quad (2.31)$$

$$\rho_L = \rho_p C_L + \rho(1 - C_L) \quad (2.32)$$

$$\mu_B = \mu_s = \mu \quad (2.33)$$

Para fluidos não-Newtonianos, Martins e Santana (1992) propuseram a seguinte correlação para o fator de atrito,

$$f_s = 0,00454 + 0,645 \cdot Re^{-0,7} \quad (2.34)$$

com,

$$Re = \frac{8\rho \cdot U_s^{2-n} \cdot D_{hs}^n}{K \left[\frac{2(3n+1)}{n} \right]^n} \quad (2.35)$$

Para o fator de atrito interfacial, f_i , a maioria dos pesquisadores utiliza a expressão proposta por Televantos *et al.* (1979). Esta expressão é uma adaptação da equação de Colebrook (1939), onde o termo da rugosidade absoluta é substituído pelo diâmetro da partícula e o coeficiente de atrito é multiplicado por dois como pode ser observado na equação (2.36).

$$\frac{1}{\sqrt{2f_i}} = -0,86 \cdot \ln \left[\frac{d_p/D_{hs}}{3,7} + \frac{2,51}{N_{Re,s} \sqrt{2f_i}} \right] \quad (2.36)$$

Cheremisinoff e Gupta (1993) sugerem, contudo, que, de acordo com a formulação apresentada por Televantos *et al.* (1979), o valor de f_i não é um parâmetro crítico do modelo. No entanto, Martins *et al.* (1996), encontraram que o valor de f_i pode ter impacto significativo nos resultados. Os autores tentaram, através da medição da espessura do leito, estimar e correlacionar o fator de atrito interfacial com diversos parâmetros. Para fluido não-Newtoniano obtiveram a dependência de f_i com o número de Reynolds (Re), o índice de comportamento do fluido (n), o diâmetro da partícula (d_p) e o diâmetro hidráulico do anular (D_h), ou seja,

$$f_i = 0,966368 \cdot Re^{-1,07116} \cdot n^{2,360211} \cdot \left(\frac{d_p}{D_h} \right)^{-2,34539} \quad (2.37)$$

Outro trabalho para a comparação da influência do fator de atrito interfacial foi realizado por Costa *et al.* (2003) que compararam a metodologia proposta por Martins *et al.* (1996) com a proposta por Televantos *et al.* (1979). Foram apresentadas curvas de altura de leito *versus* vazão, tendo sido sugerido que a escolha correta pode influenciar significativamente no resultado final da altura do leito e da concentração de sólidos na suspensão.

2.6.2. Modelo de três camadas

O modelo de três camadas proposto por Doron e Barnea (1993) para fluxo, em regime permanente em anulares é uma extensão do modelo de duas

camadas. Foi desenvolvido, segundo os autores, na tentativa de simular de uma forma mais realística o que acontece em operações de carregamento de sólidos. O modelo foi também desenvolvido por Nguyen e Rathman, (1998) e Cho *et al.* (2000).

O desenvolvimento segue a aproximação do modelo de duas camadas, com a inclusão de um leito móvel no topo da camada do leito estacionário. Tem-se então duas equações de balanço de massa (para o sólido e para o líquido) e três equações de quantidade de movimento, uma para cada camada: a camada de suspensão heterogênea sólido-líquido, o leito móvel e o leito estacionário.

Um esquema do modelo de três camadas é apresentado na Figura 2.15.

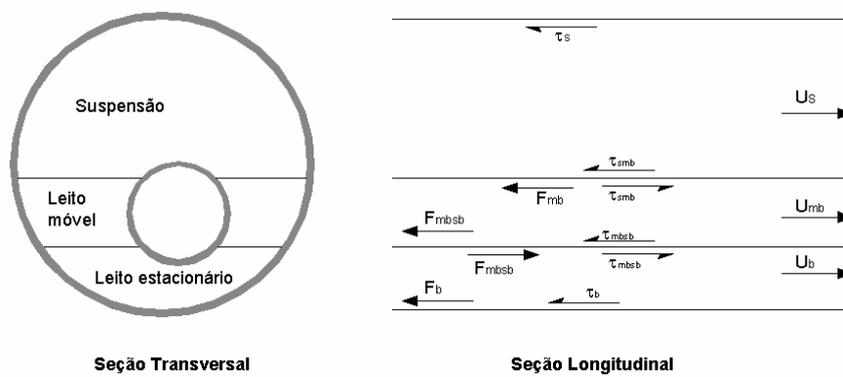


Figura 2.15 – Mapa esquemático do modelo de três camadas.

As equações deste modelo seguem a mesma linha das equações do modelo de duas camadas, ou seja, foram descritas considerando a conservação de massa para o sólido e para o líquido e a conservação da quantidade de movimento para cada uma das regiões. Estas equações são descritas a seguir.

- Equações de conservação de massa para os sólidos:

$$A_s U_s C_s + A_{ml} U_{ml} C_{ml} + A_{sl} U_{sl} C_{sl} = A_M U_M C_M \quad (2.38)$$

Onde A_s , A_{ml} , A_{sl} e A_M representam a área da suspensão, do leito móvel, do leito estacionário e total, respectivamente, U_s , U_{ml} , U_{sl} e U_M representam as velocidades da suspensão, do leito móvel, do leito estacionário e total, respectivamente e C_s , C_{ml} , C_{sl} e C_M representam as concentrações

médias de sólidos na suspensão, no leito móvel, no leito estacionário e concentração total, respectivamente.

- Equações de conservação de massa para o líquido:

$$A_s U_s (1 - C_s) + A_{ml} U_{ml} (1 - C_{ml}) + A_{sl} U_{sl} (1 - C_{sl}) = A_M U_M (1 - C_M) \quad (2.39)$$

- Equações de conservação de quantidade de movimento para a camada em suspensão:

$$A_s \frac{\Delta p}{\Delta z} = -\tau_s S_s - \tau_{sml} S_{sml} \quad (2.40)$$

Onde τ_{sml} é a tensão cisalhante na interface entre a suspensão e o leito móvel e S_{sml} é o perímetro na interface entre a suspensão e o leito móvel.

- Equações de conservação de quantidade de movimento para a camada de leito móvel:

$$A_{ml} \frac{\Delta p}{\Delta z} = -F_{misl} - F_{ml} - \tau_{misl} S_{misl} - \tau_{ml} S_{ml} + \tau_{sml} S_{sml} \quad (2.41)$$

Onde F_{misl} e F_{ml} são as forças de atrito entre o leito móvel e o leito estacionário e entre o leito móvel e a parede, respectivamente, τ_{misl} e τ_{ml} são as tensões cisalhantes entre o leito móvel e o leito estacionário e o leito móvel e a parede, respectivamente e S_{misl} e S_{ml} são os perímetros das interfaces leito móvel – leito estacionário e leito móvel – parede, respectivamente.

- Equações de conservação de quantidade de movimento para a camada de leito estacionário:

$$A_{sl} \frac{\Delta p}{\Delta z} + F_{misl} + \tau_{misl} S_{misl} \leq F_l \quad (2.42)$$

Onde F_l é a força de atrito entre o leito e a parede.

A equação (2.42), para o leito estacionário serve como condição a ser satisfeita sempre que o leito estacionário for previsto, embora esta não seja parte da solução (Doron e Barnea, 1993). A concentração na camada em suspensão é derivada da equação de difusão, como no modelo de duas camadas, com a interface agora sendo leito móvel em vez de leito estacionário.

Nguyen e Rathman (1998) utilizaram a formulação acima, mas evitaram o uso da equação de difusão. No lugar, previram a espessura do leito móvel, h_{mb} , baseado na análise das forças de Bagnold, como sugerido por Wilson e Tse (1987),

$$h_{ml} = \frac{\tau_s}{(\rho_p - \rho)gU_{ml} \tan \phi} \quad (2.43)$$

Onde τ_s é a tensão cisalhante intergranular e ϕ é a porosidade da formação.

Da teoria do contorno turbulento, os autores determinaram a velocidade média do leito móvel através da seguinte relação,

$$U_{ml} = \frac{4}{3} \frac{\sqrt{\tau_{sml} / \rho}}{K_v} \quad (2.44)$$

onde K_v representa a constante de von Kármán

Cho *et al.* (2000) usaram a formulação apresentada acima com a equação de difusão, com uma expressão experimental para a velocidade de sedimentação dos sólidos em fluidos não-Newtonianos de Chien (1994). A equação (2.45) apresenta a relação,

$$u_p^2 + 4,45 \exp(5\phi) \left(\frac{\mu}{d_p \rho} \right) u_p - 19,45 \exp(5\phi) (d_p) \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) = 0 \quad (2.45)$$

onde u_p representa a velocidade de sedimentação das partículas e ϕ a esfericidade das partículas considerada igual a 0,8.

2.6.3. Considerações sobre os modelos de camadas

O que pode ser observado sobre os modelos de camadas apresentados é que, em geral, a forma de modelar as equações que governam o problema e a solução das mesmas se dá de forma bastante parecida, as diferenças principais entre os modelos propostos são apresentadas a seguir,

- Se os modelos consideram ou não uma distribuição de sólidos na suspensão;
- As correlações para determinação do fator de atrito entre as camadas e com as paredes do anular;
- Se as tensões de Bagnold são levadas em consideração;
- A velocidade terminal das partículas em fluidos Newtonianos e não Newtonianos, levando em consideração o efeito da sedimentação e da parede.
- Fator de atrito para o fluido – parede no anular, normalmente tomados para fluidos Newtonianos e usando correlações desenvolvidas para fluxo em tubos.

Uma observação apontada por Kelessidis et al (2003), para o modelo de três camadas, é que quando o leito móvel desaparece, o modelo não se reduz ao modelo de duas camadas (o que era esperado para o caso limite). Em vez disso, um novo modelo que abrange o modelo de duas camadas é resolvido. Nenhuma comparação entre os dois modelos foi realizada de forma a justificar a complexidade do modelo de três camadas. Assim um estudo mais detalhado sobre o modelo de três camadas deve ser feito no intuito de avaliar se o esforço computacional demandado pelo é necessário, uma vez que os modelos de duas camadas apresentam boas respostas na modelagem do carregamento de sólidos.

2.7. Modelos em Regime Transiente

O transporte de cascalhos tem sido tema de estudos teóricos e experimentais de vários pesquisadores, porém, durante certo tempo, este tipo de análise foi realizada sem levar em consideração os efeitos transientes que ocorrem durante a perfuração. Uma representação mais precisa do fenômeno, requer uma simulação mais detalhada do processo, ou seja, consideração dos efeitos transientes. Esses efeitos permitem introduzir perturbações nas variáveis envolvidas no problema em qualquer instante de tempo possibilitando a reprodução das condições de campo como, por exemplo,

- Mudança na vazão do fluido;
- Troca do fluido de perfuração;
- Aumento do volume de sólidos a ser carreado (devido a instabilidades na parede do poço);
- Circulação de tampões;
- Retomada da circulação;
- Progressão do processo de limpeza de poço;
- Progressão do processo de enchimento de poços.

O primeiro trabalho sobre modelos transientes em carregamento de sólidos foi apresentado por Iyoho *et al.*(1987). A idéia era escrever equações de conservação transientes para poços verticais. Os autores utilizaram o método de diferenças finitas para resolver o problema para velocidade e concentração de sólidos. O desenvolvimento foi aparentemente interrompido, não tendo sido estendido para poços horizontais.

Martins *et al.* (1999) propuseram um modelo transiente para dutos horizontais, cuja formulação foi determinada a partir das leis de conservação de massa e quantidade de movimento, considerando o conceito do modelo de duas camadas. Não foram considerados sólidos na suspensão. O método dos volumes finitos foi utilizado para a discretização das equações e obtenção de um sistema algébrico para a solução do problema.

Os autores realizaram ainda uma análise de sensibilidade em relação aos seguintes parâmetros: vazão do fluido, densidade do fluido e taxa de penetração. E os resultados, segundo os autores, refletem as tendências observadas

experimentalmente, ou seja, uma maior remoção de cascalhos para vazões maiores e fluidos menos viscosos.

Outro trabalho, proposto por Doan et al (2003), simula o transporte de cascalhos pelo espaço anular de excentricidade arbitrária e inclui uma grande variação de fenômenos de transporte incluindo deposição e ressuspensão dos cascalhos, formação e movimentação do leito de cascalhos. O modelo consiste em equações de conservação para o fluido e os cascalhos na suspensão e no leito de cascalhos. Foram incorporadas também, as interações entre a suspensão e o leito de cascalhos e entre o fluido e os cascalhos em suspensão. A solução do modelo apresenta a distribuição da concentração de cascalhos e do fluido, velocidade pressão do fluido, perfil de velocidade do cascalho depositado ao longo do tempo.

Os autores realizaram também uma análise de sensibilidade aos parâmetros do modelo e compararam seus resultados numéricos com resultados experimentais, e concluíram que os mesmos são bastante satisfatórios.