



Suzana Santos Costa

Modelagem para o Escoamento Transiente Horizontal e Quase Horizontal na Perfuração de Poços de Petróleo

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadores: Sergio A. B. da Fontoura
Sidney Stuckenbruck

Rio de Janeiro, fevereiro de 2006.



Suzana Santos Costa

Modelagem para o Escoamento Transiente Horizontal e Quase- Horizontal na Perfuração de Poços de Petróleo

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura
Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Sidney Stuckenbruck
Co-Orientador
Olympus Software Científico Engenharia

Dr. André Leibsohn Martins
PETROBRAS

Dr. Wellington Campos
PETROBRAS

Prof. Luiz Fernando Alzuguir Azevedo
PUC-Rio

Prof. Celso Romanel
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de Fevereiro de 2006.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Suzana Santos Costa

Graduou-se em Engenharia Civil pela UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) em 1998, onde participou de diversas atividades acadêmicas relacionadas à Geotecnia. Obteve seu título de Mestre em Geotecnia pela PUC-Rio em 2001, tendo como tema da dissertação a análise de estabilidade de taludes anisotrópicos. Em seguida, iniciou o doutorado com ênfase em engenharia de petróleo e motivou-se com o tema de hidráulica de perfuração de poços de petróleo, o que culminou no desenvolvimento desta tese.

Ficha Catalográfica

Costa, Suzana Santos

Modelagem para o escoamento transiente horizontal e quase horizontal na perfuração de poços de petróleo / Suzana Santos Costa ; orientadores: Sergio A. B. da Fontoura, Sidney Stuckenbruck. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

145 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Hidráulica de poço. 3. Fluxo multifásico. 4. Transiente. 5. Limpeza de poço de petróleo. 6. Pressões durante a perfuração. I. Fontoura, Sergio A. B. da. II. Stuckenbruck, Sidney. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

Para Mamãe, Aninha e Rafael

Agradecimentos

Aos meus orientadores: Sergio Fontoura, por acreditar em mim e por abrir as portas em um momento difícil, o meu mais sincero obrigado e Sidney Stuckenbruck, pela sua dedicação em me ensinar a Mecânica dos Fluidos, pelas longas conversas sobre hidráulica e sobre a vida, você foi muito importante neste trabalho.

À minha família, especialmente para Mamãe, Aninha, Gabriel, Cíntia e Tia Dodora, obrigado pelo carinho, pelo apoio e pelo amor incondicional e a e “Vó Mary” pelas constantes orações, tenho certeza que iluminaram o meu caminho.

Ao meu namorado Rafael, pelo seu amor, por compartilhar comigo os momentos mais difíceis, por me fazer acreditar a todo o momento que daria certo, você é uma parte muito importante desta conquista. À D. Avany, Maria Cristina e Antônio, pela acolhida nesta família tão cheia de amor!

Aos meus amigos que estiveram presente neste longo caminho, que foram a minha família aqui no Rio: Mércia, Márcia, Talles, Renato, Vanessa e Janaína. Teria sido muito mais difícil sem vocês! Aos amigos que eu fiz ao longo desta longa caminhada: Suzana, Anna Paula, Bruno Holzberg, Ana Lúcia, Flávia Petersen e Ana Paula Alonso.

À André Leibsohn pela amizade, pela confiança e por todo o incentivo.

Aos amigos do GTEP PUC-Rio pela amizade e pelo apoio de vocês. Um obrigado especial a Jorge Pastor, Olga Emília, Shelly Medeiros, Luciana Conceição, Evânia Santos, Camila Borges e Flávio Matos.

Aos funcionários do departamento de Engenharia Civil, principalmente a Ana Roxo, pelos cafés, pelas conversas, pelo carinho com que sempre cuidou dos meus assuntos, fazendo com que se tornassem simples, um obrigado todo especial.

À ANP e ao GTEP PUC – Rio, pelo apoio financeiro.

Resumo

Costa, Suzana Santos; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da; Stuckenbruck, Sidney; **Modelagem para o escoamento transiente horizontal e quase horizontal na perfuração de poços de petróleo**. Rio de Janeiro, 2006. 145 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Dentre os custos considerados na exploração de um campo de petróleo, os de perfuração constituem uma parcela significativa do total. Dentro deste cenário, devemos estar atentos à remoção dos cascalhos gerados pela perfuração, também referido como limpeza de poços. Esta operação é, ainda hoje, um tema crítico na perfuração de poços de alta inclinação, pois os cascalhos que se depositam devido à ação da gravidade, formam um leito no interior do espaço anular formado entre a coluna de perfuração e o revestimento. Quando este leito ocupa grande parte do espaço anular, ele é responsável por diversos problemas na perfuração, como por exemplo, desgaste prematuro da broca, baixas taxas de penetração, fraturamento da formação, torques e arrastes excessivos na coluna de perfuração, prisão da coluna de perfuração, interrupção da circulação de fluido, aumento da pressão no anular, etc. Se esta situação não for tratada adequadamente, o problema pode provocar a perda do poço. A tese propõe uma modelagem para o escoamento multifásico na perfuração de poços de petróleo, capaz de avaliar a formação do leito de cascalhos e prever oscilações de pressões no anular decorrentes do escoamento. O modelo adotado é o de duas camadas, onde o espaço anular é dividido em duas regiões: leito e suspensão. O leito (Região 1) é formado pelos cascalhos que se sedimentam devido ao efeito gravitacional enquanto a suspensão (Região 2) é a porção do anular acima do leito depositado, formada pelo fluido de perfuração e os cascalhos transportados. As equações que constituem o modelo implementado são dadas pelas equações de conservação de massa para os sólidos e para o líquido e as equações de conservação de quantidade de movimento para o leito e para a suspensão. O método dos volumes finitos foi utilizado para a discretização das equações diferenciais juntamente com o método de Newton para a solução do sistema não-linear de equações. A solução é dada através das seguintes variáveis: altura do leito, velocidade dos sólidos no leito e na suspensão, velocidade do fluido no leito e na suspensão,

pressão no anular e concentração de sólidos no anular. Exemplos de aplicação da metodologia são apresentados e mostram o comportamento das variáveis envolvidas ao longo do tempo. Os exemplos mostram a eficácia da metodologia para simular operações de perfuração, em especial, a limpeza de poço.

Palavras-chave

Hidráulica de poço, fluxo multifásico; transiente, limpeza de poço de petróleo, pressões durante a perfuração.

Abstract

Costa, Suzana Santos; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da (Advisor); Stuckenbruck, Sidney (Advisor). **Transient modeling of horizontal and near horizontal for wellbore drilling**. Rio de Janeiro, 2006. 145 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Among the costs considered on an oil field exploration, the drilling process related ones constitute a significant share. Consequently, the focus on the removal of cuttings generated by the drilling process, or the hole cleaning operation, is essential. This operation remains a critical issue in the drilling of high inclination-wells, since the cuttings tend to deposit themselves due to gravity's action, forming a bed in the annular space formed between the drill string and the casing. When this bed takes a sizable fraction of the annular space, it becomes responsible for many problems that appear on the drilling stage, such as premature bit's exhaustion, low rates of penetration, formation fracture, excessive torque and drag on the drillstring, stuck pipe, fluid flow interruption, etc. If this situation is not treated properly, it may cause the loss of the well. This present thesis proposes a model for multiphase flow in the wellbore drilling, capable of evaluating the formation of the cuttings' bed and to predict oscillations of pressures in annulus due to the flow. A two-layer model is adopted, where the annular space is divided in two regions: bed and suspension. The bed (Region 1) is formed by the cuttings, which were deposited due to the action of gravitational force, while the suspension (Region 2) is the portion of the annular above the deposited bed, formed by the drilling fluid and cuttings. The constitutive equations of the aforementioned model are given by the equations of mass conservation for solids and liquids and the momentum conservation equations for the bed and the suspension. The finite volumes method was used to turn the differentials equations into discrete ones, while the Newton's method was applied for the solution of the nonlinear system of equations. The solution is given through the following variables: bed height, solid velocity and fluid velocity both in bed and suspension, annular pressure and solid concentration in the annular. Examples of application of the methodology are presented, showing the behavior of the involved variables through time. The examples show the efficacy of the methodology to simulate drilling operations, in special hole cleaning ones.

Keywords

Drilling hydraulic, multiphase flow, transient, hole cleaning, petroleum, pressure while drilling.

Sumário

Suzana Santos Costa ii

1 Introdução	23
1.1. Objetivos	24
1.2. Escopo da tese	25
2 Revisão Bibliográfica	27
2.1. Limpeza de poços de petróleo	29
2.2. Principais fatores que influenciam na limpeza de poço	30
2.2.1. Velocidade média do fluido no anular	30
2.2.2. Velocidade de sedimentação das partículas	31
2.2.3. Rotação da coluna de perfuração	35
2.2.4. Ângulo de inclinação do poço	35
2.2.5. Propriedades do fluido	36
2.2.6. Tamanho e forma das partículas	38
2.2.7. Excentricidade do anular	38
2.2.8. Taxa de penetração	38
2.3. Modelo reológico	39
2.4. Estudos sobre limpeza de poços	40
2.5. Padrões de fluxo	43
2.5.1. Fluxo pseudo-homogêneo	43
2.5.2. Fluxo heterogêneo	44
2.5.3. Fluxo com leito móvel	44
2.5.4. Fluxo com leito estacionário	45
2.6. Modelos de carregamento de sólidos em regime permanente	45
2.6.1. Modelo de duas camadas	48
2.6.2. Modelo de três camadas	55
2.6.3. Considerações sobre os modelos de camadas	59
2.7. Modelos em Regime Transiente	60
3 Modelo Transiente Proposto	62

3.1. Hipóteses do modelo	62
3.2. Equações Básicas	63
3.2.1. Concentração de Sólidos no Leito	64
3.2.2. Concentração de Sólidos na Suspensão	65
3.3. Equações de Conservação	66
3.3.1. Equação de continuidade para os sólidos	66
3.3.2. Equação de continuidade para o líquido	67
3.3.3. Equação de quantidade de movimento para o leito	68
3.3.4. Equação de quantidade de movimento para a suspensão	70
3.3.5. Tensões Cisalhantes na Parede e Interface	71
3.3.6. Força de Coulomb	72
3.3.7. Condição de Deslizamento (Coulomb)	73
3.4. Deslizamento Sólido-Líquido	75
3.4.1. Deslizamento no leito	75
3.4.2. Deslizamento na suspensão	76
4 Discretização e Linearização	81
4.1. Equação de conservação de massa para o líquido	82
4.2. Equação de conservação de massa para o sólido + líquido	83
4.3. Equação de quantidade de movimento para a região 1	84
4.4. Equação de quantidade de movimento para a região 2	85
4.5. Condições Iniciais	86
4.6. Solução do Modelo	87
5 Exemplos	89
5.1. Formação do leito	89
5.2. Erosão do leito	98
5.3. Aumento da taxa de penetração	104
5.4. Aumento da taxa de penetração e da vazão do fluido	107
5.5. Aumento da taxa de penetração e circulação do fluido	110
5.6. Influência da excentricidade da coluna	114
5.7. Influência da inclinação do duto	115
5.8. Influência do deslizamento sólido líquido	116
5.9. Influência dos parâmetros reológicos	117
5.10. Influência do fator de atrito nas paredes	119
5.11. Influência do fator de atrito na interface	120

6 Conclusões e Comentários Finais	122
6.1. Sugestões para futuros trabalhos	124
7 Referências Bibliográficas	125
Apêndice A – Coeficientes das Equações de Conservação	130
A.1. Equação de conservação de massa para o líquido	130
A.2. Equação de conservação de massa para o sólido + líquido	131
A.3. Equação de quantidade de movimento para a Região 1	131
A.4. Equação de quantidade de movimento para a Região 2	132
Apêndice B – Deslizamento Sólido-Líquido no Leito	134
B.1 As equações de Kozeny (1974) e Ergun (1952)	136
Apêndice C – Relações Geométricas no Círculo	138
C.1 Equações básicas	138
C.2 Caso 1 ($h < h_i$)	140
C.3 Caso 2 ($h_i < h < h_s$)	141
C.4 Caso 3 ($h > h_s$)	142
Apêndice D – Adimensionalização das Equações	143

Lista de figuras

Figura 2.1 – Transporte de sólidos em trechos verticais.	27
Figura 2.2 – Transporte de sólidos em trechos inclinados e horizontais	28
Figura 2.3 – Esquema do processo de carregamento de cascalhos.	29
Figura 2.4 – Esquema de forças atuando em uma partícula em sedimentação no interior de um fluido.	32
Figura 2.5 – Variação de velocidade de queda das partículas em função da densidade (Machado, 2001).	37
Figura 2.6 – Tipos de excentricidade da coluna de perfuração.	38
Figura 2.7 – Mapa de padrões para o escoamento sólido-líquido.	43
Figura 2.8 – Esquema do Fluxo Pseudo Homogêneo.	44
Figura 2.9 – Esquema do Fluxo Heterogêneo.	44
Figura 2.10 – Esquema do Fluxo com Leito Móvel.	45
Figura 2.11 – Esquema do Fluxo com Leito Estacionário.	45
Figura 2.12 – Esquema do modelo de duas camadas.	48
Figura 2.13 – Ângulo θ_b .	53
Figura 2.14 – Regiões do anular.	53
Figura 2.15 – Mapa esquemático do modelo de três camadas.	56
Figura 3.1 – Esquema do escoamento com duas camadas	63
Figura 3.2 – Correlação para a razão entre velocidades.	79
Figura 4.1 – Malhas de discretização deslocadas.	81
Figura 5.1 – Seção transversal do duto.	89
Figura 5.2 – Seção longitudinal do duto.	90
Figura 5.3 – Altura de leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h.	91
Figura 5.4 – Altura de leito ao longo do tempo para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h para cinco seções do duto.	92
Figura 5.5 – Altura de leito ao longo do comprimento e do tempo para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h.	92
Figura 5.6 – Pressão no anular ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h.	93
Figura 5.7 – Pressão no anular ao longo do tempo para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h para cinco seções do duto.	93

- Figura 5.8 – Velocidade do fluido no leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h. 94
- Figura 5.9 – Velocidade dos sólidos no leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h. 94
- Figura 5.10 – Velocidade do líquido no leito ao longo do tempo para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h para cinco seções do duto. 95
- Figura 5.11 – Velocidade do fluido na suspensão ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h. 96
- Figura 5.12 – Velocidade dos sólidos na suspensão ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h. 96
- Figura 5.13 – Velocidade na suspensão ao longo do tempo para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h para cinco seções do duto. 97
- Figura 5.14 – Concentração de sólidos na suspensão, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h. 97
- Figura 5.15 – Altura de leito ao longo do comprimento, em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm. 98
- Figura 5.16 – Altura de leito ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 300 gpm, para cinco seções do duto. 99
- Figura 5.17 – Altura de leito ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 300 gpm. 99
- Figura 5.18 – Pressão no anular ao longo do comprimento, em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm. 100
- Figura 5.19 – Pressão no anular ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 300 gpm, para cinco seções do duto. 100
- Figura 5.20 – Velocidade do líquido no leito ao longo do comprimento, em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm. 101
- Figura 5.21 – Velocidade dos sólidos no leito ao longo do comprimento, em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm. 101
- Figura 5.22 – Velocidade do líquido no leito ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 300 gpm, para cinco seções do duto. 102
- Figura 5.23 – Velocidade dos sólidos na suspensão ao longo do comprimento em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm. 102

Figura 5.24 – Velocidade do líquido na suspensão ao longo do comprimento em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm.	103
Figura 5.25 – Velocidade do líquido na suspensão ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 300 gpm, para cinco seções do duto.	103
Figura 5.26 – Concentração de sólidos na suspensão em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm.	104
Figura 5.27 – Taxa de penetração ao longo do tempo.	104
Figura 5.28 – Altura de leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de fluido de 250 gpm.	105
Figura 5.29 – Altura de leito ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 250 gpm, para cinco seções do duto.	105
Figura 5.30 – Altura de leito ao longo do comprimento e do tempo.	106
Figura 5.31 – Pressão no anular ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de fluido de 250 gpm.	106
Figura 5.32 – Pressão no anular ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 250 gpm, para cinco seções do duto.	107
Figura 5.33 – Variação da taxa de penetração e da vazão do fluido ao longo do tempo.	107
Figura 5.34 – Altura de leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para taxa de penetração de 10 e 20 m/h e vazão do fluido de 250 e 300 gpm.	108
Figura 5.35 – Altura de leito ao longo do tempo para taxa de penetração de 10 e 20 m/h e vazão do fluido de 250 e 300 gpm para cinco seções do duto.	108
Figura 5.36 – Altura de leito ao longo do comprimento e do tempo para um aumento da taxa de penetração de 10 para 20 m/h e da vazão do fluido de 250 para 350 gpm.	109
Figura 5.37 – Pressão no anular ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para taxa de penetração de 10 e 20 m/h e vazão do fluido de 250 e 300 gpm.	109
Figura 5.38 – Pressão no anular ao longo do tempo para taxa de penetração de 10 e 20 m/h e vazão do fluido de 250 e 300 gpm para cinco seções do duto.	110
Figura 5.39 – Variação da taxa de penetração ao longo do tempo.	111
Figura 5.40 – Altura de leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para taxa de penetração de variando de 10 a 20 m/h e de 20 m/h a zero.	111

Figura 5.41 – Altura de leito ao longo do tempo variando de 10 a 20 m/h e de 20 m/h a zero para cinco seções do duto.	112
Figura 5.42 – Altura de leito ao longo do comprimento e do tempo , para taxa de penetração de variando de 10 a 20 m/h e de 20 m/h a zero.	112
Figura 5.43 – Pressão no anular ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para taxa de penetração de variando de 10 a 20 m/h e de 20 m/h a zero.	113
Figura 5.44 – Pressão no anular ao longo do tempo para taxa de penetração variando de 10 a 20 m/h e de 20 m/h a zero para cinco seções do duto.	113
Figura 5.45 – Influência da excentricidade da coluna na altura do leito.	114
Figura 5.46 – Influência da excentricidade da coluna na pressão.	115
Figura 5.47 – Inclinações do duto.	115
Figura 5.48 – Influência da inclinação do duto na altura do leito.	116
Figura 5.49 – Influência do deslizamento entre as fases na altura do leito.	117
Figura 5.50 – Influência da reologia do fluido na altura do leito.	118
Figura 5.51 – Influência da reologia do fluido na pressão.	118
Figura 5.52 – Influência do fator de atrito nas paredes na altura do leito.	119
Figura 5.53 – Influência do fator de atrito nas paredes na pressão.	120
Figura 5.54 – Influência do fator de atrito na interface na altura do leito.	121
Figura 5.55 – Influência do fator de atrito na interface na pressão.	121
Figura C.1 – Esquema dos ângulos para um anular excêntrico – Caso 1.	140
Figura C.2 – Esquema dos ângulos para um anular excêntrico – Caso 2.	141
Figura C.3 – Esquema dos ângulos para um anular excêntrico – Caso 3.	142

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Correlações para determinação do coeficiente de arraste das partículas para fluidos Newtonianos.	33
Tabela 2.2 – Correlações para determinação do coeficiente de arraste das partículas para fluidos não-Newtonianos (Modelo de Potência).	34
Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados na simulação.	90
Tabela 5.2 – Parâmetros reológicos considerados.	117
Tabela B.1 – Comparação dos valores de κ e κ_t .	137

Lista de Símbolos

A_1	área transversal definida pela Região 1 (leito), m ²
A_2	área transversal definida pela Região 2 (suspensão), m ²
A_L	área do leito, m ²
A_{l1}	área transversal ocupada por líquido na Região 1, m ²
A_{l2}	área transversal ocupada por líquido na Região 2, m ²
A_s	área da suspensão, m ²
A_s	área transversal ocupada por sólidos nas Regiões 1 e 2, m ²
A_l	área transversal ocupada por líquido nas Regiões 1 e 2, m ²
A_{s1}	área transversal ocupada por sólidos na Região 1, m ²
A_{s2}	área transversal ocupada por sólidos na Região 2, m ²
A_M	área total, m ²
A_{ml}	área do leito móvel, m ²
A_{sl}	área do leito estacionário, m ²
A_T	área transversal livre, m ²
A_i^*	área total do cilindro-i, m ²
C_D	coeficiente de arraste
C_{f1}	concentração volumétrica de fluido no leito
C_{f2}	concentração volumétrica de líquido na suspensão
C_{s1}	concentração de sólidos na Região 1
C_{s2}	concentração de sólidos na Região 2
C_s	concentração da suspensão
C_M	concentração total
C_L	concentração do leito.
C_{ml}	concentração média de sólidos no leito móvel
C_{sl}	concentração média de sólidos no leito estacionário
d_p	diâmetro da partícula, m

D_i	diâmetro do cilindro-i, m
D_h	diâmetro hidráulico do anular, m
D_e	diâmetro externo, m
$\frac{dP}{dz}$	perda de carga, Pa/m
e	excentricidade
E	força devido ao empuxo, N
f_s	fator de atrito na suspensão
f_l	fator de atrito no leito
f_i	fator de atrito na interface
F_{mlsl}	força de atrito entre o leito móvel e o leito estacionário, N
F_{ml}	força de atrito entre o leito móvel e a parede, N
F_L	força de atrito entre o leito e a parede, N
F_C	força de atrito / unidade de comprimento – sólidos-parede, N
F_s	força decorrente do contato entre as partículas do leito e as paredes do anular, N
g	aceleração da gravidade, m/s ² .
h	altura do leito, m
h_i	altura da base até a linha inferior do cilindro-2, m
h_s	altura da base até a linha superior do cilindro-2, m
K	índice de consistência do fluido, Pa.s ⁿ
K_v	constante de von Kármán
L_{12}	comprimento da interface, m
$L_{1,ext}$	comprimento do contato entre o leito e a superfície do poço, m
$L_{1,int}$	comprimento do contato entre o leito e a superfície do <i>drillpipe</i> , m
\dot{m}_s	fluxo de massa depositada no leito sólido por unidade de volume, kg/s-m ³
\dot{m}_f	fluxo de massa (fonte) para o fluido de perfuração por unidade de volume, kg/s-m ³
n	índice de comportamento reológico do fluido
P_e	força devido a gravidade, N

P_i	perímetro molhado – interface líquido-líquido, m
P_{wl}	perímetro molhado – interface líquido-parede, m
P_{ij}	perímetro da interface da região-i com a região-j, m
q_s	deposição volumétrica / unidade de comprimento dos sólidos, m ² /s
q_l	deposição volumétrica / unidade de comprimento do líquido, m ² /s
R_i	raio do cilindro-1 (i= 1,2), m
Re	número de Reynolds
S_s	perímetro da região entre a suspensão e a parede, m
S_{sml}	perímetro molhado da interface suspensão – leito móvel, m
S_{mlsl}	perímetro molhado do leito móvel - estacionário, m
S_L	perímetro da região entre o leito e a parede, m
S_i	perímetro da região entre o líquido de suspensão e o leito, m
u_1	velocidade <i>in situ</i> na Região 1 (para velocidades iguais), m/s
u_2	velocidade <i>in situ</i> na Região 2 (para velocidades iguais), m/s
u_{s1}	velocidade <i>in situ</i> dos sólidos na Região 1, m/s
u_{s2}	velocidade <i>in situ</i> dos sólidos na Região 2, m/s
u_{f2}	velocidade do líquido na suspensão, m/s
u_{l1}	velocidade <i>in situ</i> do líquido na Região 1, m/s
u_{l2}	velocidade <i>in situ</i> do líquido na Região 2, m/s
U_L	velocidade do leito, m/s
U_S	velocidade da suspensão, m/s
U_M	velocidade total, m/s
U_{ml}	velocidade do leito móvel, m/s
U_{sl}	velocidade do leito estacionário, m/s
V_S	volume de sólidos por unidade de comprimento e de tempo, m ² /s
v_{DEP}	taxa de deposição volumétrica, m/s
v_{ENT}	taxa de carreamento, m/s
y	coordenada vertical perpendicular ao eixo do poço, m

α	fração da área da Região 2 (suspensão) para a área total
β_1	ângulo que circunscreve setor que define região-3, rad
β_2	ângulo que circunscreve setor no cilindro-2, rad
λ_1	função de atrito entre o leito e a parede do poço
ϕ'	esfericidade
ρ_1	densidade do leito, kg/m ³
ρ_s	densidade do sólido, kg/m ³
ρ_f	densidade do fluido, kg/m ³
ρ_s	densidade da suspensão, kg/m ³
ρ_L	densidade do leito, kg/m ³
ρ_p	densidade da partícula, Kg/m ³
τ_s	tensão cisalhante na suspensão, N/m ²
τ_L	tensão cisalhante no leito, N/m ²
τ_i	tensão cisalhante na interface sólido-líquido, N/m ²
τ_{sml}	tensão cisalhante entre a suspensão e o leito móvel, N/m ²
τ_{mlsl}	tensão cisalhante entre o leito móvel e o leito estacionário, N/m ²
τ_{sml}	tensão cisalhante entre a suspensão e o leito móvel, N/m ²
τ_w	tensão cisalhante na interface líquido-parede, N/m ²
τ_b	tensão cisalhante de Bagnold (suspensão de sólidos), N/m ²
τ_{sf}	tensão cisalhante entre o sólido e o fluido, N/m ²
τ_s	tensão cisalhante entre o sólido e a parede, N/m ²
τ_{fs}	tensão cisalhante entre o líquido e o leito, N/m ²
ε	coeficiente de difusão
θ_b	ângulo descrito na Figura 2.13, graus
Δs	comprimento do trecho, m

*Pedras no caminho?
Guardo todas!
Um dia vou construir um castelo!
Fernando Pessoa*