

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA E DE MATERIAIS

MARYELEN HISSAE MIYOSHI

**MODELAGEM DO DESLOCAMENTO DE UMA COLUNA
DE PERFURAÇÃO IMERSA EM LEITO DE CASCALHOS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2020

MARYELEN HISSAE MIYOSHI

**MODELAGEM DO DESLOCAMENTO DE UMA COLUNA
DE PERFURAÇÃO IMERSA EM LEITO DE CASCALHOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia Térmica, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

Orientador: Prof. Ph.D. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão

CURITIBA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Miyoshi, Maryelen Hissae

Modelagem do deslocamento de uma coluna de perfuração imersa em leito de cascalhos [recurso eletrônico] / Maryelen Hissae Miyoshi. -- 2020.

1 arquivo texto (91 f.): PDF; 1,71 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 05 jun. 2020).

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2020

Bibliografia: p. 88-91.

1. Engenharia Mecânica e de Materiais - Dissertações. 2. Poços de petróleo - Perfuração. 3. Perfuração e broqueamento. 4. Fluxo granular. 5. Torque. 6. Arrasto (Aerodinâmica). I. Negrão, Cezar Otaviano Ribeiro orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, inst. III. Título.

CDD: Ed. 23 -- 620.1

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271
Aluna de Biblioteconomia: Josiane Manguera



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 386

A Dissertação de Mestrado intitulada: **Modelagem do deslocamento de uma coluna de perfuração imersa em leito de cascalhos**, defendida em sessão pública pela Candidata **Maryelen Hissae Miyoshi**, no dia 08 de maio de 2020, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica E De Materiais, área de concentração: Engenharia Térmica, linha de pesquisa: Mecânica dos Fluidos, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica E De Materiais.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Ph.D. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Silvio Luiz De Mello Junqueira - UTFPR

Prof. Dr. Erick de Moraes Franklin - UNICAMP

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 08 de maio de 2020.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e da Petrobras.

“Any theory is better than no
theory at all.”

Adrian Bejan

RESUMO

MIYOSHI, Maryelen Hissae. MODELAGEM DO DESLOCAMENTO DE UMA COLUNA DE PERFURAÇÃO IMERSA EM LEITO DE CASCALHOS. 92 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

O investimento em novas tecnologias para a exploração de reservatórios de petróleo em cenários desafiadores cresce cada vez mais no setor de óleo e gás. Uma das técnicas que tem sido extensamente utilizada para a construção de poços de petróleo em condições ambientais adversas é a perfuração direcional. Todavia, a construção de poços em águas ultraprofundas torna essa atividade extremamente onerosa. Neste cenário qualquer problema operacional durante a perfuração do poço de petróleo é responsável por aumentar os custos do projeto ou até inviabilizá-lo. Dentre os problemas operacionais mais comuns está o aprisionamento mecânico da coluna de perfuração. O problema ocorre quando há a formação de um leito de cascalhos no interior do poço. A presença do leito de cascalho pode causar o aumento das forças de atrito sobre a coluna durante manobras de retirada, podendo danificar os equipamentos e levar ao aprisionamento mecânico da coluna. Apesar do aprisionamento da coluna de perfuração no interior do poço ser um problema recorrente, ainda não há solução eficaz para evitar sua ocorrência. Atualmente a detecção do aprisionamento é realizada através do monitoramento de parâmetros como a força de arraste sobre a coluna. Sendo assim o objetivo do trabalho proposto é modelar as forças que atuam sobre o conjunto broca-coluna durante a manobra de retirada. Tais forças surgem da interação entre os equipamentos, leito de cascalhos, fluido e parede do poço. O modelo é baseado no acoplamento das equações de conservação da massa e quantidade de movimento e as forças relacionadas à presença do leito de cascalhos são baseadas nas teorias de escoamento granular. O leito de cascalho estudado é composto por partículas esféricas de vidro e o fluido utilizado é a água. As forças calculadas pelo modelo apresentaram tendência similar ao observado experimentalmente para diferentes velocidades de deslocamento do conjunto, alturas do leito de cascalho e áreas de broca. Além disso, o modelo se mostrou capaz de calcular os casos em que haveria ou não a formação de plugue. A análise de sensibilidade do modelo revelou que o ângulo de repouso da pilha de cascalhos influencia no tempo necessário para a formação do plugue, enquanto que o coeficiente de atrito adotado impacta na magnitude das forças calculadas. Por fim foi realizado um estudo de caso acoplando o modelo proposto à um modelo de arraste existente, no qual foram identificadas potenciais contribuições da utilização da modelagem proposta para a detecção de problemas de campo.

Palavras-chave: aprisionamento da coluna de perfuração, plugue, força de arrasto, leito de cascalhos, material granular.

ABSTRACT

MIYOSHI, Maryelen Hissae. MODELING THE DISPLACEMENT OF DRILL STRING IMMERSSED IN CUTTINGS BED. 92 f. Dissertação – MSc Thesis - Postgraduate Program in Mechanical and Materials Engineering, Federal University of Technology. Curitiba, 2020.

Investment in new technologies for the exploration of oil reservoirs in challenging scenarios is growing in the oil and gas industry. One of the techniques that has been widely used for the construction of oil wells in adverse environmental conditions is the directional drilling. However, the construction of wells in ultra-deep waters makes this activity extremely costly. In this scenario, any operational problem during the drilling process is responsible for increasing project costs or even making it unfeasible. Among the most common operational problems is the mechanical stuck of the drill string. The problem occurs when a cuttings bed is formed inside the well. The presence of the cuttings bed can cause increased frictional forces during pull out of hole operation, which can damage the equipment and lead to mechanical stuck of drill string. Although the stuck of the drill string inside the well is a usual problem, there is still no effective solution to prevent its occurrence. Currently, stuck detection is carried out by monitoring parameters such as the drag force. Therefore, the objective of this work is to model the forces acting on drill string assembly during the pull out of hole. Such forces arise from the interaction between equipment, cuttings bed, fluid and well wall. The model is based on lumped mass and momentum conservation equations and the forces due to cuttings bed are determined using theories of granular flow. The studied cuttings bed is composed of spherical glass particles and the fluid used is water. The forces calculated by the model showed a similar trend to that observed experimentally for different drill pipe velocities, cuttings bed heights and drill bit areas. In addition, the model proved to be able to calculate the cases whether there would be a plug formation or not. The sensitivity analysis of the model revealed that the angle of repose of the cuttings pile influences the time required for the formation of the plug, while the friction coefficient adopted impacts the magnitude of the calculated forces. Finally, a case study was carried out coupling the proposed model to an existing drag model, in which potential contributions from the use of the proposed modeling were identified to detect field problems.

Keywords: drill string stuck, plug, drag force, cuttings bed, granular material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Desvio da trajetória do poço para atingir objetivo que não está diretamente abaixo da sua posição na superfície.	20
Figura 1.2 – Aprisionamento mecânico da coluna devido à (a) formação de um leito de cascalhos e (b) geometria do poço.	22
Figura 1.3 – Esforços atuantes na coluna em diferentes regiões do poço.	23
Figura 1.4 – Exemplo de gráfico de monitoramento do T&D.	24
Figura 1.5 – Aprisionamento mecânico devido à formação de um leito de cascalhos.	25
Figura 1.6 – (a) Esquema do experimento realizado por Peliano (2018) indicando o deslocamento do fluido e dos cascalhos devido a movimentação axial da coluna. (b) Corte transversal da região em frente a broca onde ocorre o deslocamento dos cascalhos para a parte superior do leito. (Autoria própria baseado no trabalho de Peliano (2018))	26
Figura 1.7 – Configurações identificadas durante a movimentação da coluna na presença do leito de cascalhos em que (a) representa a situação inicial que pode se desenvolver para (b) onde não ocorre a obstrução ou (c) onde o anular é obstruído. (Autoria própria baseado no trabalho de Peliano (2018))	27
Figura 2.1 – Comparação entre o modelo desenvolvido por Fazaelizadeh (2013) e dados de campo para a carga no gancho utilizando fator de atrito de 0,2 durante a retirada da coluna. Destacada pelo círculo pontilhado está a região em que o modelo não consegue prever a carga no gancho.	29
Figura 2.2 – Movimentação do leito de cascalhos em experimentos de retirada da coluna de perfuração. Na configuração (a) não ocorre o aprisionamento e na (b) ocorre o aprisionamento.	30
Figura 2.3 – Medições da carga necessária para retirada do conjunto (<i>Overpull</i>) em função da razão entre Abroca e Aaberta em uma série de testes.	31
Figura 2.4 – Os diferentes comportamentos do meio granular, como sólido, líquido ou gás.	34
Figura 2.5 – (a) Pilha de sementes de mostarda empilhadas com um ângulo menor que o ângulo de repouso. (b) A mesma pilha após a inclinação ser aumentada suavemente para criar uma avalanche.	35
Figura 2.6 – (a) Ilustração do experimento realizado por Ding et al. (2011) em que um objeto é movimentado através do meio granular. (b) Representação das forças resultantes obtidas experimentalmente em preto, simuladas em vermelho para cada forma e em verde as forças obtidas pela simulação na superfície de cada objeto.	36

Figura 2.7 – (a) Ilustração do experimento realizado por Gravish et al. (2010) em que uma placa é movimentada em meio granular. (b) Força de arrasto média, $\langle F_D \rangle$, cresce linearmente em relação a fração volumétrica, ϕ . (c) Oscilações temporais em F_D se tornam periódicas à medida que ϕ aumenta.	37
Figura 2.8 – Campo de velocidade das partículas devido ao deslocamento da placa imersa no meio granular.	38
Figura 3.1 – Representação dos estágios observados experimentalmente por Peliano (2018). (a) Conjunto coluna-broca se deslocam com velocidade (V_c) constante imerso em leito de cascalho com altura constante. (b) Formação da pilha de cascalho. (c) Anular totalmente obstruído e crescimento do plugue.	41
Figura 3.2 – (a) Representação da evolução do acúmulo de cascalhos na região em frente a broca que se desloca junto com o conjunto coluna-broca. Representação da seção transversal (b) no instante inicial t_0 , (c) no instante t_1 com acúmulo de cascalho e (d) no instante t_2 em que há formação de plugue.	43
Figura 3.3 – Representação (a) da área da broca imersa no leito, A_{bl} (hachurado verde) e área aberta na região da broca, A_{ab} (quadriculado amarelo), (b) da área da coluna imersa no leito, A_{cl} (hachurado verde) e área aberta na região da coluna, A_{ac} (quadriculado amarelo).	44
Figura 3.4 – Representação do segmento circular destacado pela região quadriculada e as variáveis utilizadas para o cálculo da área do segmento.	44
Figura 3.5 – Representação do volume de cascalhos, V_{sai} , que sai do volume de controle.	45
Figura 3.6 – Representação da quantidade de cascalhos que sai do volume de controle em (a) Saída 1 = V_{sai1} considerando apenas o volume que se encontra entre a broca e a parede do poço e (b) Saída 2 = $V_{sai1} + V_f$ considerando o carregamento de cascalhos pelo fluido.	47
Figura 3.7 – Representação da pilha formada pelo acúmulo de cascalhos em frente a broca, com altura h , comprimento z_p e ângulo de repouso ϕ	48
Figura 3.8 – Representação do volume da pilha nos planos $x - y$ e $y - z$	48
Figura 3.9 – Aproximação do volume da pilha por um prisma triangular para obtenção dos valores iniciais para o cálculo iterativo de z_p e h	49
Figura 3.10–Fluxograma do cálculo iterativo para obtenção dos valores de z_p e h para cada instante de tempo.	50
Figura 3.11–Representação das forças sobre a broca e a coluna de perfuração durante a movimentação axial.	51
Figura 3.12–Representação da área lateral da região aberta da coluna, A_{lac}	54

Figura 3.13–Representação das forças que surgem devido a formação do plugue. Sendo $F_{plugue\mu}$ a força de atrito entre o plugue e a parede do poço e $F_{plugue\Delta P}$ a força devido ao gradiente de pressão no plugue.	55
Figura 3.14–Representação da área lateral do plugue, A_{lp} utilizada para o cálculo da força de atrito entre o plugue e a parede do poço.	56
Figura 3.15–(a) Comprimento do plugue, L_{plugue} , considerando o comprimento máximo da pilha, $Z_{máxPilha}$. (b) L_{plugue} considerando metade de $Z_{máxPilha}$	58
Figura 3.16–Fluxograma da sequência de cálculo resumido das seções 3.1 e 3.2.	59
Figura 4.1 – Esquema da unidade experimental utilizada por Peliano (2018). (Peliano (2018))	60
Figura 4.2 – Principais elementos da unidade experimental utilizada por Peliano (2018) para realização dos testes de deslocamento da coluna de perfuração imersa em leito de cascalhos. (Peliano (2018))	61
Figura 4.3 – Condições estudadas experimentalmente por Peliano (2018) e que serão utilizadas para comparação com os resultados do modelo proposto.	61
Figura 4.4 – Verificação do ângulo de repouso da pilha de partículas formada durante experimento utilizando o aparato de Peliano (2018).	63
Figura 4.5 – Resultado calculado da força de tração F_T em função do tempo para condição A considerando <i>Saída 1</i> e $Z_{máxPilha}$ da Figura 4.3 comparado com os resultados experimentais de Peliano (2018).	64
Figura 4.6 – Curvas das forças $F_{plugue\mu}$, F_{leito} , F_{fluido} e $F_{plugue\Delta P}$ em função do tempo, t , para condição A considerando <i>Saída 1</i> e $Z_{máxPilha}$ da Figura 4.3 e $V_c = 0, 10 \text{ m/s}$	65
Figura 4.7 – Curvas das forças $F_{plugue\mu}$, F_{leito} , F_{fluido} e $F_{plugue\Delta P}$ em função do tempo, t , para condição A considerando <i>Saída 1</i> e $Z_{máxPilha}$ da Figura 4.3 e $V_c = 0, 20 \text{ m/s}$	66
Figura 4.8 – Esquema da resistência ao escoamento do fluido (a) durante o crescimento da pilha de cascalhos e (b) após a obstrução do anular e crescimento do plugue.	67
Figura 4.9 – Resultado calculado da F_T em função do tempo, para condição A da Figura 4.3 considerando $1/2 Z_{máxPilha}$ comparado com os resultados experimentais de Peliano (2018).	68
Figura 4.10–Resultado calculado da F_T em função do tempo, para condição A da Figura 4.3 considerando $1/2 Z_{máxPilha}$ e <i>Saída 2</i> comparado com os resultados experimentais de Peliano (2018).	69
Figura 4.11–Comparação entre a <i>Saída 1</i> e <i>2</i> no desenvolvimento de L_{plugue} e z_p , para $V_c = 0, 10 \text{ m/s}$ e condição A da Figura 4.3 considerando $1/2 Z_{máxPilha}$	70

Figura 4.12–Resultados calculados de F_T , para $V_c = 0, 10 \text{ m/s}$ e <i>Sáida 1</i> , <i>Sáida 1 e 2</i> , <i>Sáida 2</i> com condição A da Figura 4.3 considerando $1/2 Z_{máxPilha}$ comparado com o resultado experimental de Peliano (2018).	71
Figura 4.13–Resultado calculado da F_T em função do tempo, para condição B da Figura 4.3 considerando $1/2 Z_{máxPilha}$ e <i>Sáida 1</i> comparado com os resultados experimentais de Peliano (2018).	73
Figura 4.14–Desenvolvimento de L_{plugue} e z_p , para <i>Sáida 1</i> , $V_c = 0, 10 \text{ m/s}$, $H_{leito} =$ $0,033 \text{ m}$ e <i>Broca 2</i>	74
Figura 4.15–Representação da área aberta, A_a , para (a) <i>Broca 1</i> e (b) <i>Broca 2</i> utilizadas no experimento de Peliano (2018).	75
Figura 4.16–Resultado calculado da F_T em função do tempo, para condição B da Figura 4.3 considerando $1/2 Z_{máxPilha}$ e <i>Sáida 1</i> comparado com os resultados experimentais de Peliano (2018).	76
Figura 4.17–Desenvolvimento de L_{plugue} e z_p , para <i>Broca 1</i> e condição C da Figura 4.3 considerando <i>Sáida 1</i> e $1/2 Z_{máxPilha}$	77
Figura 4.18–Desenvolvimento da A_{pilha} , para <i>Broca 1</i> e condição C da Figura 4.3 considerando <i>Sáida 1</i> e $1/2 Z_{máxPilha}$	77
Figura 4.19–Resultado da F_T calculada em função do tempo, variando o valor do ângulo de repouso ϕ	79
Figura 4.20–Comparação do desenvolvimento de L_{plugue} e z_p , para $\phi = 15^\circ, 20^\circ$ e 30° .	80
Figura 4.21–Resultado da F_T calculada em função do tempo, variando o valor de μ .	81
Figura 4.22–Resultado da F_{leito} calculada em função do tempo, variando o valor de μ .	81
Figura 4.23–Resultado da $F_{plugue\mu}$ calculada em função do tempo, variando o valor de μ	82
Figura 4.24–Forças sobre um elemento da coluna durante a manobra de retirada da coluna de perfuração do poço. (Adaptado de Johancsik et al. (1984)) .	83
Figura 4.25–Geometria do poço utilizado para estudo de caso retirado do trabalho de Tveitan (2011) em que a escala de cores representa a variação da inclinação em graus de cada trecho do poço em relação ao eixo vertical da profundidade.	84
Figura 4.26–Força de arrasto durante a retirada da coluna em função da profundi- dade comparando o resultado sem leito e com a presença de leito com alturas que representam 6%, 8%, 10% e 12% do raio do poço.	85
Figura 4.27–Força de arrasto durante a retirada da coluna em função da profundi- dade comparando o resultado sem leito e com a presença de leito com alturas que representam 6%, 8%, 10% e 12% do raio do poço.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Equações para o cálculo das áreas A_{ab} , A_{ac} e A_{cl}	46
Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados nos cálculos dos esforços sobre o conjunto base- ados no experimento de Peliano (2018)	62
Tabela 4.2 – Valores dos coeficientes da reta ajustada (a e b), do coeficiente de deter- minação (r^2) e do desvio padrão dos resíduos ($RMSD$) para os casos de $V_c = 0, 10$ m/s	71
Tabela 4.3 – Valores dos coeficientes da reta ajustada (a e b), do coeficiente de deter- minação (r^2) e do desvio padrão dos resíduos ($RMSD$) para os casos de $V_c = 0, 20$ m/s	72
Tabela 4.4 – Valores dos coeficientes da reta ajustada (a e b), do coeficiente de deter- minação (r^2) e do desvio padrão dos resíduos ($RMSD$) para os casos com $H_{leito} = 0, 033$ m dividido em duas partes.	74
Tabela 4.5 – Valores dos coeficientes da reta ajustada (a e b), do coeficiente de deter- minação (r^2) e do desvio padrão dos resíduos ($RMSD$) para os casos da <i>Broca</i> 1.	78
Tabela 4.6 – Parâmetros utilizados para análise de sensibilidade do modelo	78
Tabela 4.7 – Parâmetros utilizados para o estudo de caso	84

LISTA DE SIGLAS

ROP	Taxa de penetração – <i>Rate of penetration</i>
T&D	Torque e Arrasto – <i>Torque and Drag</i>
BHA	Conjunto de fundo da coluna de perfuração – <i>Bottom-hole Assembly</i>
DEM	Método dos elementos discretos – <i>Discrete Element Method</i>
RMSD	Desvio padrão dos resíduos – <i>Root mean square deviation</i>

SÍMBOLOS

Letras Gregas

Símbolo	Descrição	Unidades
ϵ	fração de volume vazio	-
η	viscosidade do fluido	$Pa.s$
γ	ângulo da superfície de contato	rad
μ	coeficiente de atrito	-
ϕ	ângulo de repouso dos cascalhos	rad
ρ	massa específica do fluido	kg/m^3
ρ_s	massa específica dos cascalhos	kg/m^3
τ_{wc}	tensão de cisalhamento na parede da coluna	Pa
τ_{wp}	tensão de cisalhamento na parede do poço	Pa
θ	ângulo do arco do segmento circular	rad

Letras Romanas

Símbolo	Descrição	Unidades
δ	razão entre o diâmetro do poço e o diâmetro da coluna	-
Δd	deformação da coluna devido a reação do poço	m
\dot{m}_{entra}	taxa de escoamento de massa que entra no volume de controle	kg/s
V_a	vazão volumétrica do fluido no anular	m^3/s
V_p	volume da partícula	m^3
$V_{pilha/broca}$	volume da pilha de cascalhos que se encontra em frente a broca	m^3
V_{pilha}	volume da pilha de cascalhos	m^3
V_{sai}	volume de cascalhos que sai do volume de controle	m^3

a	coeficiente angular	-
A_p	área superficial da partícula	m^2
A_{ab}	área aberta da broca	m^2
A_{ac}	área aberta da coluna	m^2
A_{bl}	área da broca imersa no leito	m^2
A_{cl}	área da coluna imersa no leito	m^2
A_{cs}	area transversal total do leito empacotado	m^2
A_{lap}	área lateral da região aberta do poço	m^2
A_{lp}	área lateral do plugue	m^2
A_{sc2b}	área do segmento circular de duas bases	m^2
A_{sc}	área do segmento circular	m^2
A_{ta}	área transversal do espaço anular	m^2
A_{wc}	área lateral da coluna	m^2
A_{wp}	área lateral do poço	m^2
b	coeficiente linear	N
c	secante do segmento circular	m
C_c	fator de aderência	-
C_s	fator de correção	-
D	diâmetro da seção do leito compactado	m
d_p	diâmetro da partícula	m
D_{coluna}	diâmetro da coluna	m
$D_{poço}$	diâmetro do poço	m
f_a	fator de atrito	-
F_D	força de arrasto hidrodinâmico	N
f_M	fator de atrito de Montillet	-
F_N	força normal	N

F_T	força de tração necessária para a movimentação da broca e coluna	N
F_z	força na direção z	N
F_{fluido}	força de arrasto hidrodinâmico	N
f_{lam}	fator de atrito para regime laminar	-
F_{leito}	força devido ao contato entre o conjunto de equipamentos e o leito de cascalhos	N
$F_{plugue\Delta P}$	força devido ao gradiente de pressão do plugue	N
$F_{plugue\mu}$	força devido ao atrito entre o plugue e a parede do poço	N
F_{plugue}	força devido a formação do plugue	N
f_{tr}	fator de atrito para região de transição	-
f_{turb}	fator de atrito para regime turbulento	-
h	altura da pilha de cascalhos	m
h_s	altura do segmento circular	m
h_t	altura da porção triangular do segmento circular	m
h_{inf}	altura da base inferior do segmento circular de duas bases	m
h_{sup}	altura da base superior do segmento circular de duas bases	m
L_c	comprimento da coluna em contato com o fluido	m
L_l	comprimento do leito compactado	m
L_{broca}	comprimento da broca	m
L_{coluna}	comprimento da coluna	m
L_{plugue}	comprimento do plugue	m
$L_{poço}$	comprimento do poço	m
m	índice de consistência	$Pa.s^n$
M_{VC}	Massa acumulada no volume de controle	kg

n	índice de lei de potência	-
nd	número de dados	-
P	pressão	Pa
P_m	pressão média	Pa
Q_{entra}	vazão volumétrica que entra no volume de controle	m^3/s
r	raio do segmento circular de duas bases	m
r^2	coeficiente de determinação	-
R_{broca}	raio da broca	m
R_{coluna}	raio da coluna	m
Re	número de Reynolds	-
Re_p	número de Reynolds da partícula	-
$RMSD$	Desvio padrão dos resíduos	N
s	arco de círculo	m
s_{pilha}	arco do círculo da pilha de cascalhos	m
t	tempo	s
V_c	velocidade de deslocamento do conjunto coluna-broca	m/s
v_s	velocidade superficial do fluido	m/s
v_z	velocidade na direção z	m/s
V_{ae}	velocidade efetiva do escoamento na região anular	m/s
X	coordenada X do ponto de interseção	m
x_p	largura da pilha	m
Y	coordenada y do ponto de interseção	m
z_p	comprimento da pilha de cascalhos	m
$Z_{máxPilha}$	comprimento máximo da pilha de cascalhos	m

SUMÁRIO

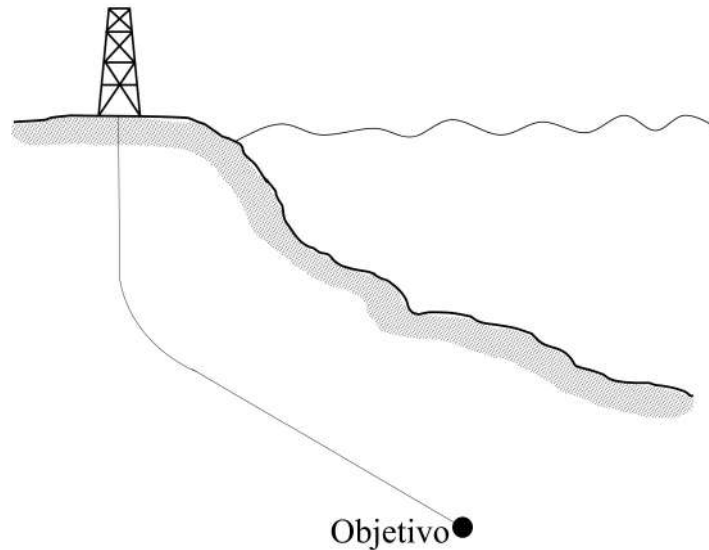
1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contexto	20
1.2	Descrição do Problema	25
1.3	Objetivos	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1	Modelos de Torque e Arraste	28
2.2	Movimentação da coluna em leito de cascalhos	30
2.3	Arrasto hidrodinâmico	32
2.4	Meio granular	33
2.4.1	Ângulo de repouso	34
2.4.2	Arrasto em meio granular	35
2.4.3	Gradiente de pressão em meio granular	38
2.5	Síntese do Capítulo	39
3	MODELAGEM MATEMÁTICA	41
3.1	Cálculo do acúmulo de cascalho	42
3.2	Cálculo das forças sobre a broca e a coluna	51
3.2.1	Força de arrasto hidrodinâmico (F_{fluido})	52
3.2.2	Força de atrito entre o conjunto coluna-broca e o leito de cascalho (F_{leito})	54
3.2.3	Força de arrasto relacionada ao plugue (F_{plugue})	55
3.3	Síntese do capítulo	57
4	RESULTADOS	60
4.1	Comparação com os resultados experimentais	60
4.1.1	Avaliação da Velocidade do conjunto - V_c	64
4.1.2	Altura do leito - H_{leito}	72
4.1.3	Área transversal da broca - A_b	75
4.2	Análise de sensibilidade	78
4.2.1	Efeito do Ângulo de repouso - ϕ	79
4.2.2	Efeito do Coeficiente de atrito - μ	80
4.3	Estudo de caso	82
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
	Referências	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Indústrias do setor de óleo e gás investem no desenvolvimento de tecnologias para a exploração de reservatórios de petróleo em cenários desafiadores como os encontrados em águas ultraprofundas. O desenvolvimento de novas tecnologias busca minimizar os custos e obter maior aproveitamento dos recursos encontrados. A otimização dos processos de perfuração, que antes buscava simplesmente aumentar a taxa de penetração (ROP), atualmente analisa todos os aspectos do processo de perfuração dando maior atenção ao planejamento e execução do poço (ZAKARIYA et al., 2015). Uma das técnicas que tem sido extensamente utilizada para a exploração de reservatórios é a perfuração direcional. A técnica consiste no desvio intencional da trajetória do poço da vertical para atingir objetivos que não estão diretamente abaixo da sua posição na superfície (ROCHA et al., 2011), como ilustra a Figura 1.1.

Figura 1.1 – Desvio da trajetória do poço para atingir objetivo que não está diretamente abaixo da sua posição na superfície.



Fonte: ROCHA et al. (2011).

A perfuração direcional é também utilizada para aumentar a produtividade do poço e reduzir o impacto ambiental. Todavia a construção de poços em condições ambientais desfavoráveis torna essa atividade extremamente onerosa. Segundo a Petrobras a atividade de construção de poços absorve cerca de 1/3 do volume de investimentos em projetos de desenvolvimento de produção na região do pré-sal (PETROBRAS, 2018).

Dentro deste cenário, qualquer problema operacional que surge durante a perfu-

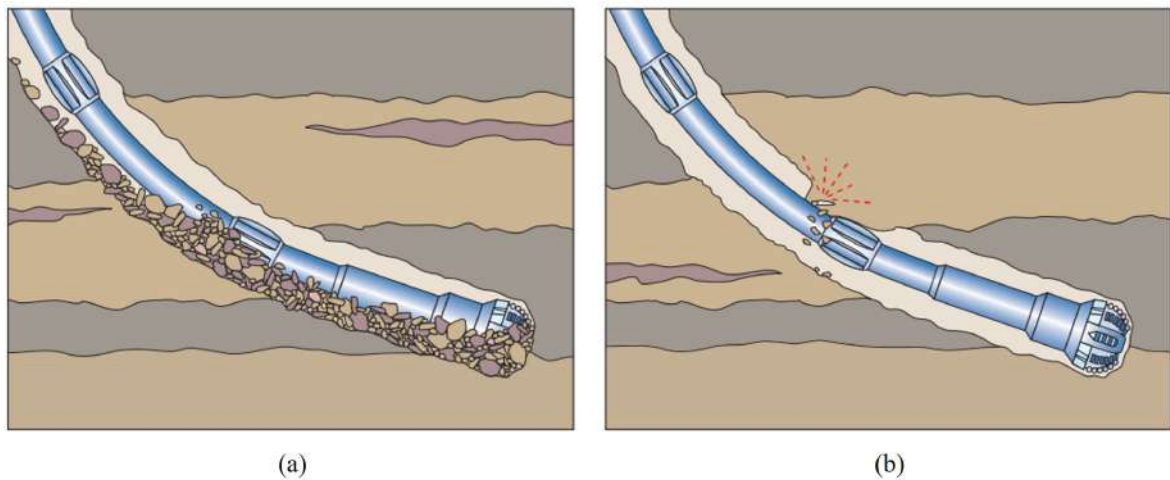
ração de poços de petróleo gera tempo não produtivo aumentando os custos do projeto ou até o inviabilizando. Segundo Zakariya et al. (2015), o tempo não produtivo gerado por ineficiências durante a perfuração é responsável pelo aumento de 15% no custo da construção de um poço de petróleo. Devido ao alto valor econômico envolvido, as empresas petrolíferas reconhecem que o monitoramento do poço durante todo o processo de perfuração é indispensável para que seja possível identificar possíveis complicações. Os problemas operacionais mais comuns já identificados são (CHIEZA, 2011):

- Influxo de fluidos indesejados (*kick*) para o interior do poço;
- Perda de fluido de perfuração para a formação, impedindo a circulação de fluido no poço;
- Prisão da coluna de perfuração dentro do poço;
- Dificuldade de manobra (introdução e retirada da coluna de perfuração);
- Dificuldade de avanço da coluna durante a perfuração.

Dos problemas operacionais identificados, o aprisionamento da coluna é recorrente nas operações de perfuração (YARIM et al., 2007). Em estudo realizado por Muqem et al. (2012) para a empresa petrolífera Saudi Aramco, os autores identificaram que os incidentes de aprisionamento representam 25% de todo tempo não produtivo anualmente. Os problemas de prisão da coluna de perfuração podem ser classificados em dois grupos principais: aprisionamento diferencial, causado pela existência de diferencial de pressão entre a formação e o poço, e aprisionamento mecânico, devido a restrição física da coluna (SHADIZADEH et al., 2010). Em estudo realizado pela British Petroleum em 1989 constatou-se que a prisão mecânica da coluna é mais frequente e dispendiosa sendo responsável por 70% do custo total com aprisionamento em poços (BRADLEY et al., 1991). Condição similar foi observada pela Saudi Aramco, a empresa relatou que do total de problemas com aprisionamento, mais da metade (69,5%) foram devido à prisão mecânica da coluna de perfuração (MUQEEM et al., 2012). Outro estudo realizado por Yarim et al. (2007), mostrou que entre os mais de 100 casos de aprisionamento analisados 65% foram ocasionados devido a formação de um plugue de cascalhos, 21% devido ao diferencial de pressão e apenas 14% foram provocados pela geometria do poço.

O aprisionamento mecânico ocorre quando a coluna de perfuração está sendo movimentada e é causado por obstrução ou restrição física. A Figura 1.2 apresenta duas situações de prisão mecânica da coluna: na Figura 1.2(a), a coluna se prende devido à formação de leito de cascalhos e na Figura 1.2(b), a geometria do poço provoca restrição à retirada da coluna.

Figura 1.2 – Aprisionamento mecânico da coluna devido à (a) formação de leito de cascalhos e (b) geometria do poço. (Adaptado de Johnson et al. (2013).)



Fonte: Adaptado de Johnson et al. (2013).

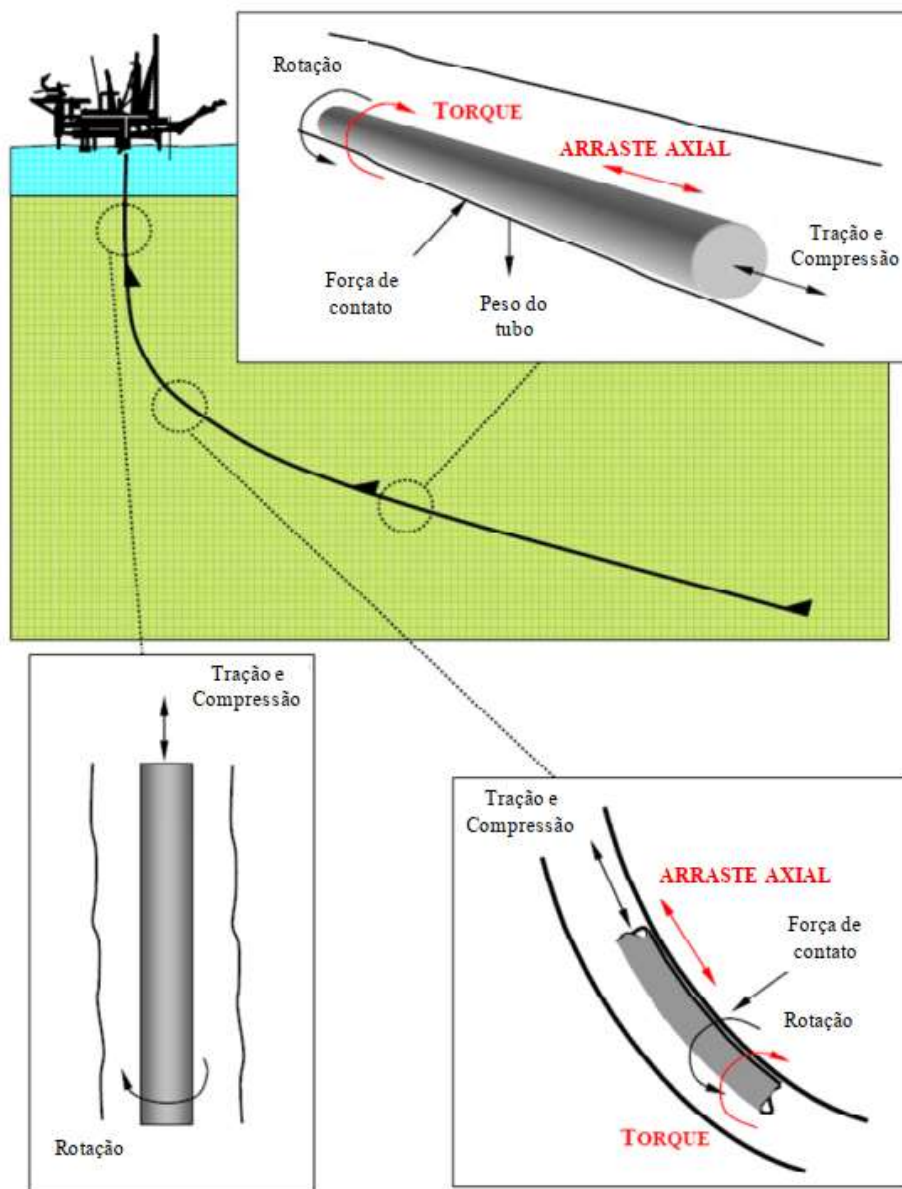
Apesar do aprisionamento mecânico da coluna de perfuração dentro do poço ser um problema recorrente durante a operação de perfuração, ainda não há solução eficaz para evitá-lo. Atualmente a detecção do aprisionamento é realizada através do monitoramento de alguns parâmetros como Alshaikh et al. (2019):

- Força de arrasto;
- Taxa de penetração;
- Pressão na linha de injeção do fluido;
- Torque;
- Peso aplicado à broca;
- Velocidade de rotação da coluna.

Dentre esses parâmetros Alshaikh et al. (2019) identificaram, através da análise de dados de campo, que o monitoramento da pressão na linha de injeção do fluido e da força de arraste apresentaram a maior relevância para os incidentes de aprisionamento em relação aos outros parâmetros analisados. O monitoramento dos valores de torque e arrasto (T&D) para identificação do aprisionamento da coluna é proposto por diversos autores como Mims et al. (2003), Kucs et al. (2008), Glomstad (2012), Zakariya et al. (2015), Salminen et al. (2017), Amina e Alhalemb (2018).

Os esforços de T&D na coluna de perfuração estão representados na Figura 1.3 para diferentes regiões do poço. Como pode-se observar na Figura 1.3 durante a perfuração

Figura 1.3 – Esforços atuantes na coluna em diferentes regiões do poço.



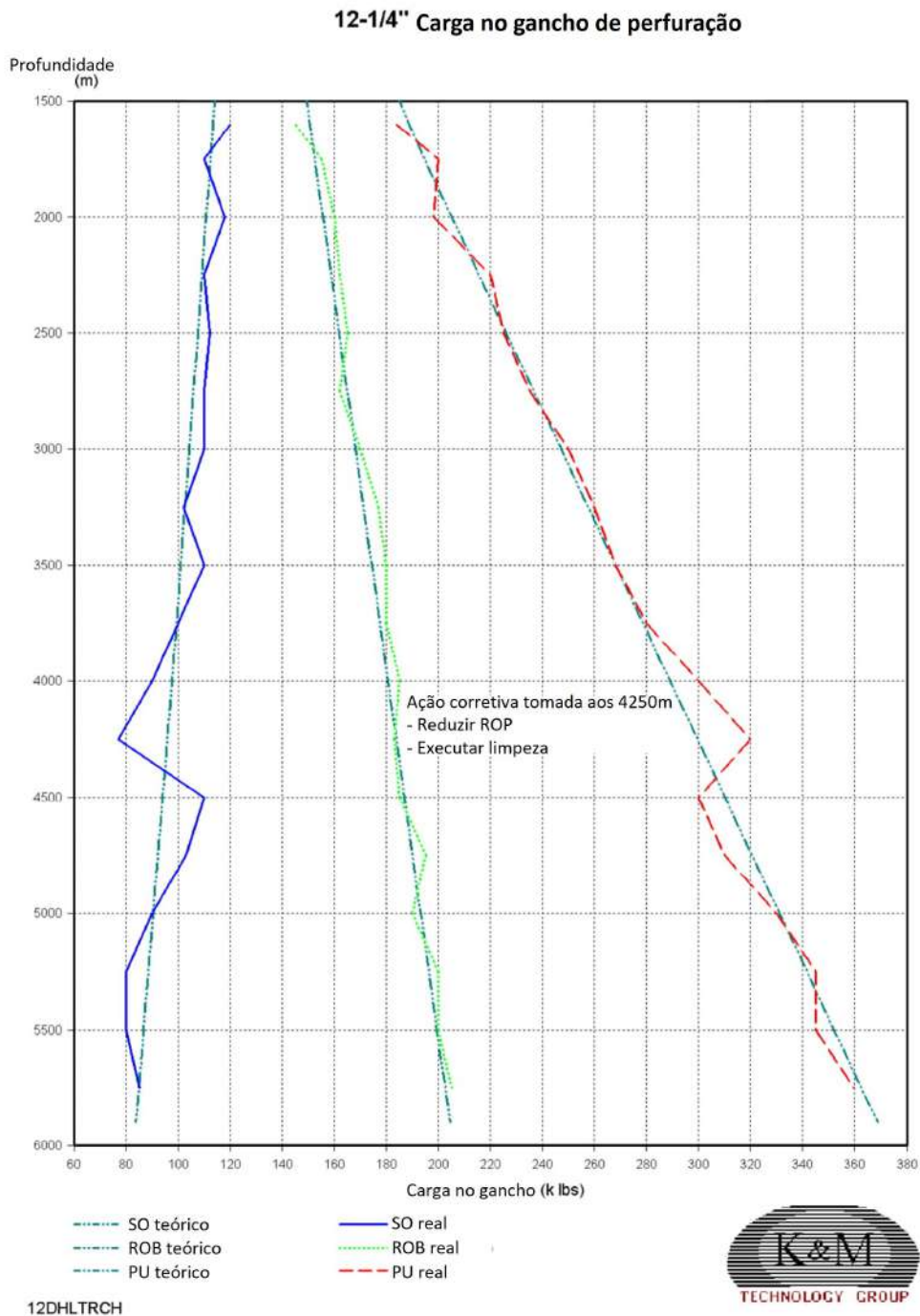
Fonte: Adaptado de Chieza (2011).

de poços verticais, a coluna encontra-se centralizada no poço não existindo forças de contato adicionais. Por outro lado, conforme aumenta a inclinação do poço, observa-se o surgimento de forças de contato entre a coluna e a parede do poço. As forças são cumulativas, logo, com o aumento da profundidade aumenta-se também as forças de contato e conseqüentemente maiores serão os valores de torque e arrasto.

Atualmente a identificação de possíveis problemas é realizada através da comparação dos valores de torque e arrasto obtidos em tempo real com valores previstos utilizando curvas dos esforços na coluna obtidas de poços já perfurados e modelos matemáticos. Durante o monitoramento caso os resultados obtidos em tempo real divergirem do previsto, então, há indícios de problema. De acordo com Mims et al. (2003) as pre-

visões teóricas, que são comparadas com os valores reais, devem ser confiáveis, para que as medidas corretas sejam tomadas e evite o aumento do tempo não produtivo ou até mesmo a perda dos equipamentos de perfuração.

Figura 1.4 – Exemplo de gráfico de monitoramento do T&D.



Fonte: Adaptado de Mims et al. (2003).

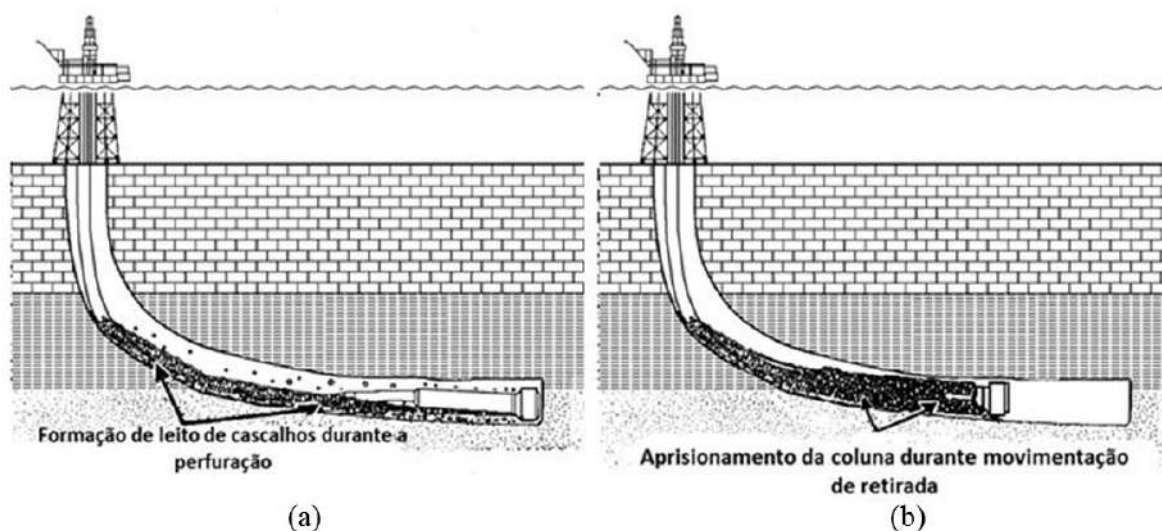
Um exemplo de monitoramento do torque e arrasto utilizado para identificação de problemas é apresentado por Mims et al. (2003). Na Figura 1.4 são apresentadas as

curvas teóricas e reais dos valores de *slack-off*¹ (SO), peso da coluna rotacionando (ROB) e *pick-up*² (PU). Observa-se que a partir da profundidade de 3750 m a curva dos valores reais de SO e PU começam a se distanciar de suas respectivas curvas teóricas e em 4250 m, devido ao grande desvio da curva, os autores identificaram uma possível ineficiência na limpeza. A partir deste ponto são adotadas medidas de correção como a redução na taxa de penetração (ROP) e a circulação do fluido de perfuração para executar a limpeza do poço. Após a execução dos procedimentos os valores reais voltaram a acompanhar a curva teórica prevista. Conclui-se então que problemas operacionais como o acúmulo de cascalhos, devido a ineficiência na limpeza do poço são os principais responsáveis por gerar altos valores de T&D, além do atrito gerado entre a coluna e a parede do poço.

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A presença do leito de cascalhos pode causar aumento das forças de atrito na coluna durante a sua movimentação, podendo danificar o conjunto de equipamentos acoplados na coluna de perfuração que se encontra no fundo do poço, também conhecido como BHA (*Bottom Hole Assembly*). Conforme ilustrado na Figura 1.5(a) durante a perfuração direcional do poço ocorre a formação de leito de cascalhos. Conseqüentemente durante manobras que necessitam a retirada da coluna de perfuração, a presença do leito de cascalhos pode ocasionar o aprisionamento da coluna, ilustrado na Figura 1.5(b).

Figura 1.5 – Aprisionamento mecânico devido à formação de leito de cascalhos.



Fonte: Adaptado de SPE (2015).

As técnicas para eliminar o leito de cascalho dentro do poço nem sempre são eficientes. Portanto, compreender o comportamento do leito e os esforços envolvidos durante

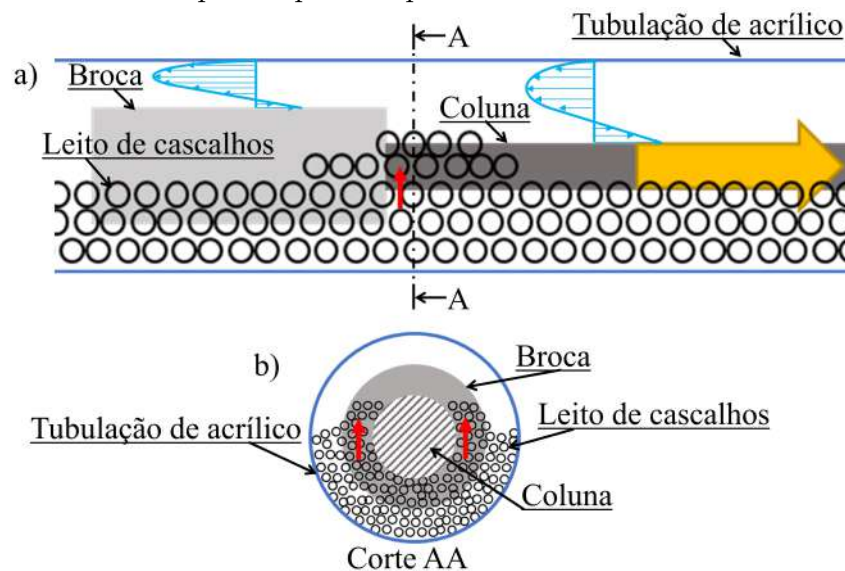
¹ Leitura da carga quando a coluna está entrando no poço

² Leitura da carga quando a coluna está sendo retirada do poço

a movimentação axial da coluna de perfuração na presença do leito de cascalhos auxiliam na tomada de decisão para não agravar a situação.

O deslocamento axial do conjunto coluna e broca imerso em leito de esferas de vidro foi estudado experimentalmente por Peliano (2018). Na Figura 1.6 é apresentado um esquema do experimento realizado pelo autor. Foi observado que a movimentação axial do conjunto coluna e broca ocasiona o deslocamento do fluido, como ilustrado na Figura 1.6(a) pelos perfis de velocidade na região da broca e da coluna. Com o deslocamento do fluido surgem sobre a coluna forças de arrasto hidrodinâmico, devido ao arrasto do fluido pela movimentação da coluna de perfuração e à movimentação do fluido pela diferença de pressão na região anular. Além do escoamento do fluido o deslocamento axial da broca e da coluna de perfuração acarretam na movimentação dos cascalhos que formam o leito. Como pode ser observado na Figura 1.6(a) pela seta vermelha, os cascalhos da região logo em frente a broca são deslocados para a região superior do leito. Os cascalhos que se deslocam para a região superior do leito, como mostra a Figura 1.6(b), se acumulam em frente à broca. A partir deste cenário são observadas duas configurações.

Figura 1.6 – (a) Esquema do experimento realizado por Peliano (2018) indicando o deslocamento do fluido e dos cascalhos devido a movimentação axial da coluna. (b) Corte transversal da região em frente a broca onde ocorre o deslocamento dos cascalhos para a parte superior do leito.

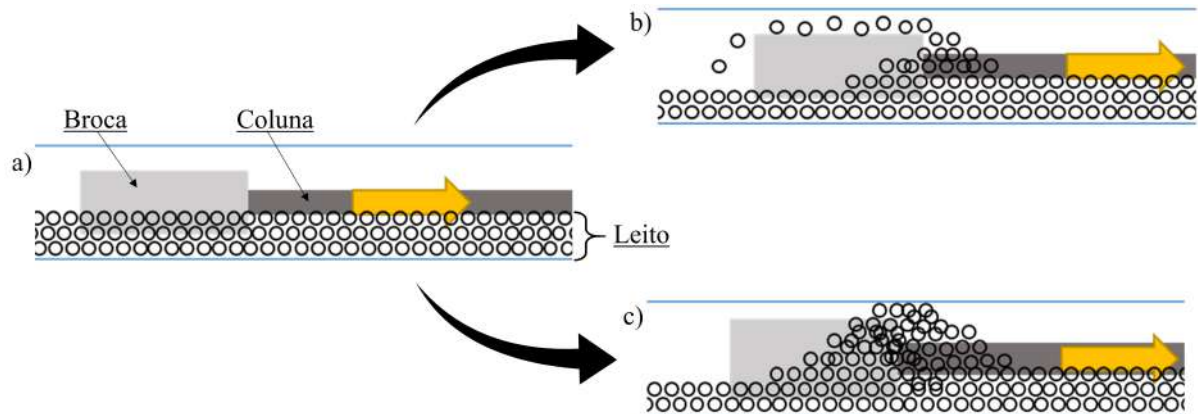


Fonte: Autoria própria baseado no trabalho de Peliano (2018).

Na Figura 1.7 são identificadas as configurações, que ocorrem durante o deslocamento da coluna de perfuração. A Figura 1.7(a) representa a situação inicial da broca e da coluna na presença do leito de cascalhos. Durante o deslocamento, dependendo da velocidade de deslocamento do conjunto, da altura do leito e da área transversal da broca duas situações podem ocorrer, como ilustrado nas Figuras 1.7(b) e (c). No cenário representado pela Figura 1.7(b) os cascalhos são carregados, não ocasionando a obstrução do

espaço anular, já no caso mostrado na Figura 1.7(c) a quantidade de cascalho acumulado cresce obstruindo o espaço anular e formando um plugue.

Figura 1.7 – Configurações identificadas durante a movimentação da coluna na presença do leito de cascalhos em que (a) representa a situação inicial que pode se desenvolver para (b) onde não ocorre a obstrução ou (c) onde o anular é obstruído.



Fonte: Autoria própria baseado no trabalho de Peliano (2018).

Em ambas as configurações observadas o deslocamento axial da coluna em contato com o leito é responsável pelo surgimento de forças de atrito sobre a coluna contrárias ao movimento. A obstrução do anular e a formação do plugue de cascalhos acarretam no aparecimento de novas forças sobre a coluna. Uma dessas forças surge devido ao gradiente de pressão ocasionado pelo escoamento do fluido através do plugue, que se caracteriza como um meio granular. Como o plugue se desloca junto ao conjunto broca e coluna, o contato entre o plugue e a parede do poço também é responsável por forças contrárias ao movimento.

1.3 OBJETIVOS

No presente trabalho, é desenvolvido um modelo matemático para prever esforços sobre a coluna de perfuração devido à interação do conjunto coluna-broca com um leito de cascalhos. A modelagem é baseada nas equações de conservação da massa e quantidade e movimento e as forças relacionadas à presença do leito de cascalhos são embasadas nas teorias de escoamento granular, considerando o meio granular como meio contínuo. O objetivo é avaliar os efeitos da altura do leito, da área da broca e da velocidade da coluna sobre a força necessária para tracionar a coluna.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está dividido em quatro seções principais. Na primeira, são apresentados trabalhos que modelam os esforços de torque e arraste sobre a coluna de perfuração. Em seguida, são apresentados trabalhos que analisaram a movimentação da coluna na presença de leito de cascalhos. Nas duas últimas seções são apresentados trabalhos que abordam conceitos utilizados na elaboração do modelo matemático.

2.1 MODELOS DE TORQUE E ARRASTE

Existem diversos modelos de T&D na literatura que são utilizados nas fases de planejamento, monitoramento e pós-análises, para identificação de problemas operacionais no processo de perfuração do poço. Cada modelo possui suas próprias hipóteses e teorias específicas e são divididos em dois tipos: *soft-string* e *stiff-string*.

O modelo *soft-string* (JOHANCSIK et al., 1984; SHEPPARD et al., 1987; MAIDLA et al., 1987; PAYNE et al., 1996; AADNOY et al., 1998; AADNØY; ANDERSEN, 2001; AADNOY et al., 2010) considera que a coluna acompanha a trajetória do poço sempre em contato com a parede, como uma corda ou corrente, desconsiderando a rigidez na flexão da coluna e os efeitos da folga radial. As únicas cargas consideradas na coluna de perfuração são resultantes somente da combinação dos efeitos da gravidade e do atrito decorrente do contato entre a coluna e a parede do poço.

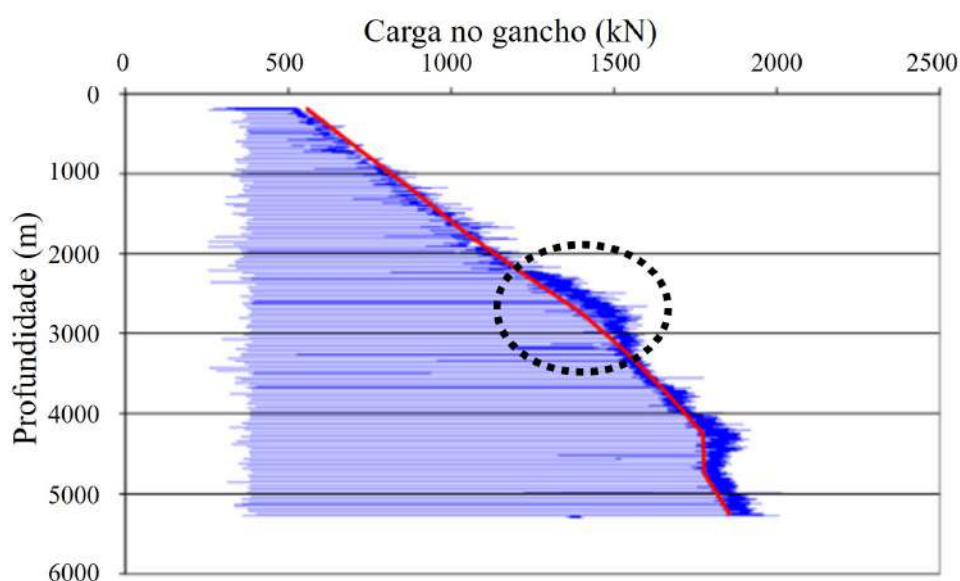
Já o modelo *stiff-string* (HO et al., 1988; LI et al., 1993; MENAND et al., 2006; MITCHELL et al., 2009; MITCHELL et al., 2015; MIRHAJ et al., 2016) leva em conta a folga radial e a rigidez da coluna de perfuração e de seus componentes. Dessa maneira, a curvatura da coluna pode ser diferente da curvatura do poço, resultando em menor contato com a parede do poço, contudo, forças na parede lateral aumentam quando a tubulação rígida é forçada próximo a seções curvadas e diminuem quando a coluna passa por seções retas.

A partir dos trabalhos encontrados foi possível identificar que os estudos de modelagem dos esforços de torque e arraste na coluna focam na investigação da influência da trajetória do poço. Todavia os diversos efeitos mecânicos que podem causar aumento no T&D, como a presença de leito de cascalhos, formações instáveis, ressaltos, excessiva interação dos estabilizadores com o poço e arrasto hidrodinâmico são considerados através de um único fator de atrito.

O fator de atrito utilizado nos modelos de T&D são obtidos de experimentos (BOL et al., 1986; MAIDLA et al., 1990) com diferentes tipos de fluido de perfuração

ou através da análise de dados de poços já perfurados, a partir do perfil da carga no gancho¹ (MCCORMICK et al., 2013; FAZAEUZADEH, 2013). Porém, a utilização do fator de atrito nem sempre consegue prever aumentos da carga no gancho como observou Fazaelizadeh (2013) na Figura 2.1, em que são comparados dados de campo com o modelo desenvolvido utilizando o fator de atrito de 0,2. O autor atribui o aumento de forças na região de 2180 m à 3140 m ao aumento da inclinação do poço e conseqüentemente o acúmulo de cascalhos. Fazaelizadeh (2013) relata que nessas condições apenas uma operação de limpeza do poço não é suficiente para remover todos os cascalhos e o resultado é a avalanche de cascalhos para a região do BHA. Apesar da quantidade de cascalhos não ser suficiente para obstruir o espaço anular, verificou-se que é suficiente para aumentar a carga no gancho como pode-se observar na região destacada pelo círculo pontilhado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Comparação entre o modelo desenvolvido por Fazaelizadeh (2013) e dados de campo para a carga no gancho utilizando fator de atrito de 0,2 durante a retirada da coluna. Destacada pelo círculo pontilhado está a região em que o modelo não consegue prever a carga no gancho.



Fonte: Adaptado de Fazaelizadeh (2013).

Devido ao fato dos modelos de T&D utilizados para o monitoramento das condições do poço durante a perfuração não contabilizarem a existência de leito de cascalho nos cálculos, não é possível avaliar as condições de aprisionamento da coluna de perfuração durante a sua movimentação.

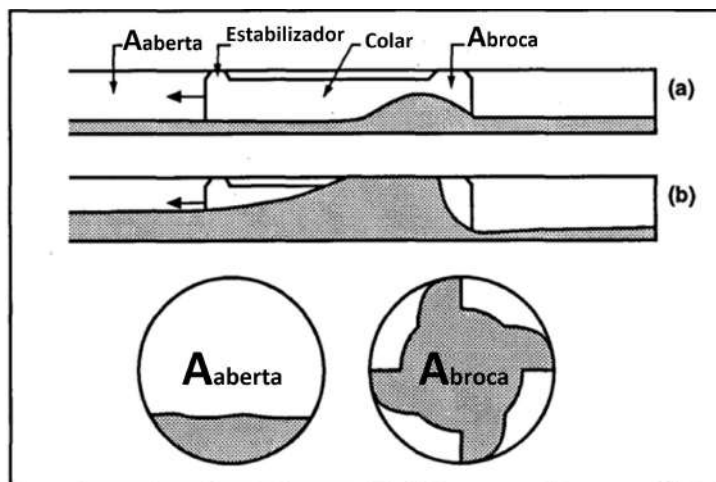
¹ A carga no gancho (*hook load*), durante a perfuração, é igual ao peso da coluna imersa no fluido. Algumas forças podem fazer variar o peso suspenso no gancho, como, por exemplo, a força de atrito causada pela fricção ao longo da parede do poço durante o movimento de subida ou descida da coluna, especialmente em poços direcionais (FERNANDEZ et al., 2009).

2.2 MOVIMENTAÇÃO DA COLUNA EM LEITO DE CASCALHOS

A movimentação da coluna de perfuração na presença de leito de cascalho foi estudada por Rasi et al. (1994). Os autores avaliaram as condições necessárias para evitar os problemas causados devido à limpeza ineficiente do poço e à presença do leito de cascalhos. Um dos experimentos realizados no estudo consistiu na movimentação do BHA através de tubo transparente parcialmente ocupado por leito de cascalhos.

Rasi et al. (1994) observaram que duas condições diferentes podem surgir durante a retirada da coluna de perfuração, conforme mostra a Figura 2.2. Na primeira situação, Figura 2.2(a), o BHA (estabilizador, colar e broca) causa deformação no leito, e os cascalhos se acumulam próximos à broca formando uma pilha de altura constante que se desloca ao longo do poço enquanto a coluna é retirada. Na segunda situação mostrada, na Figura 2.2(b), a pilha de cascalhos formada próximo à broca cresce continuamente até obstruir toda a área transversal do poço e impedir a movimentação da coluna. Os autores observaram que o aprisionamento ocorre quando a área aberta (A_{aberta}) é menor que a área da broca (A_{broca}).

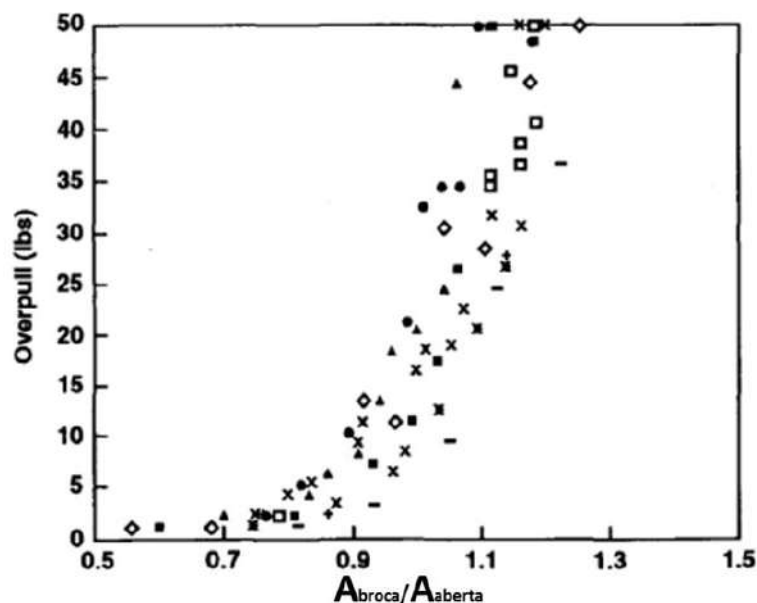
Figura 2.2 – Movimentação do leito em experimentos de retirada da coluna de perfuração. Na configuração (a) não ocorre o aprisionamento e na (b) ocorre o aprisionamento.



Fonte: Adaptado de Rasi et al. (1994).

A força necessária para a retirada do BHA do poço foi então avaliada como função de diversas variáveis, que incluem o tamanho da tubulação que compõe a coluna de perfuração, a área transversal da broca e o seu formato, o comprimento do colar e o diâmetro externo, a altura inicial do leito, o tipo de cascalho e a inclinação do poço. As medições da carga necessária para retirada do conjunto (*Overpull*) em função da razão entre A_{broca} e A_{aberta} em uma série de testes conduzidos em tubo de 3,5 polegadas são apresentadas na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Medições da carga necessária para retirada do conjunto (*Overpull*) em função da razão entre *Abroca* e *Aaberta* em uma série de testes.



Fonte: Adaptado de Rasi et al. (1994).

Observa-se que a carga necessária para retirada do BHA cresce rapidamente quando a razão *Abroca/Aaberta* aumenta além do valor de aproximadamente 1 (um). Os autores constataram que para minimizar a probabilidade de altas cargas e a prisão da coluna durante a retirada é necessário manter a área aberta (*Aaberta*) a maior possível e a área da broca (*Abroca*) a menor possível.

Comportamento similar foi observado por Peliano (2018) em estudo mais recente realizado experimentalmente durante o deslocamento de uma coluna de perfuração imersa em leito de cascalhos. Peliano (2018) também observou que a força necessária para a retirada da coluna cresce exponencialmente em função da razão entre a área da broca e a área aberta.

A partir das observações obtidas por Rasi et al. (1994) e Peliano (2018), únicos autores a avaliar a influência do leito nas forças de arrasto, alguns fenômenos responsáveis pelo surgimento de forças contrárias ao movimento dos equipamentos (broca e coluna) foram identificados. Geralmente os fenômenos identificados são incorporados a um único fator de atrito, porém como descrito no capítulo anterior as forças que surgem devido a interação equipamento-fluido-leito podem ser associadas à diferentes mecanismos. O fluido é responsável pelas forças devido ao arrasto hidrodinâmico, já o leito de cascalhos se caracteriza como meio granular. Para compreender os fenômenos associados às forças geradas durante a movimentação da coluna na presença do leito de cascalhos, os seguintes tópicos são investigados: arrasto hidrodinâmico e meio granular. Sendo que o meio granular foi subdividido em: ângulo de repouso, arrasto em meio granular e gradiente de pressão em meio granular.

2.3 ARRASTO HIDRODINÂMICO

A força de arrasto hidrodinâmico se deve a dois efeitos: arrasto de fluido pela movimentação da coluna de perfuração e movimentação do fluido por diferença de pressão na região anular. As paredes da coluna em movimento arrastam o fluido na direção do deslocamento da coluna, e o volume de fluido deslocado pela coluna se move na direção oposta por diferença de pressão no espaço anular. Segundo Fazaelizadeh (2013) a velocidade do fluido de perfuração no anular depende de fatores como:

- A natureza do fluido (newtoniano ou não newtoniano);
- Regime de escoamento (laminar ou turbulento);
- Velocidade da tubulação;
- Extremidade da coluna aberta ou fechada.

Segundo Mason et al. (2007) os efeitos do escoamento do fluido nos cálculos de T&D são ignorados na maioria dos modelos. Os primeiros autores a introduzirem os efeitos hidrodinâmicos na modelagem *soft-string* foram Maidla et al. (1987). Propondo um modelo em que a força de arrasto hidrodinâmico é obtida através do cálculo da pressão de *surge e swab*² associada com o escoamento do fluido de perfuração causado pelo movimento da coluna dentro do poço. O modelo desconsidera os efeitos de inércia e compressibilidade do fluido. O procedimento de cálculo para o gradiente de pressão é baseado nas correlações de Burkhardt et al. (1961) e Fontenot et al. (1974) para fluidos de Bingham e de Lei de potência em poços.

Os efeitos de arrasto hidrodinâmico também foram estudados por Bhalla et al. (1998). O modelo proposto calcula a força de arrasto na coluna gerada devido ao escoamento interno na coluna e externo, entre a coluna e o poço. A força de arrasto hidrodinâmico foi calculada a partir da tensão de cisalhamento do escoamento, obtida através de métodos numéricos.

Mme e Pal (2012) utilizou o modelo de Maidla et al. (1987) para o desenvolvimento de uma ferramenta de monitoramento das pressões de *surge e swab* durante operações de perfuração. Segundo autor a escolha do modelo se deu pois a ferramenta deveria ser de fácil uso e utilizando apenas dados que podem ser obtidos pelo engenheiro de perfuração na plataforma de petróleo.

Fazaelizadeh (2013) também utilizou o modelo de Maidla et al. (1987) para analisar os efeitos do arrasto hidrodinâmico no desenvolvimento de um modelo de T&D. O

² *Surge* é o aumento da pressão devido à movimentação descendente da coluna e *Swab* é a redução da pressão devido à movimentação ascendente da coluna (FERNANDEZ et al., 2009)

autor observou que quanto maior a viscosidade do fluido de perfuração maior é a força de arrasto hidrodinâmico observada. Foi verificado também que com o aumento velocidade de deslocamento da coluna o regime de escoamento se aproxima do modo turbulento aumentando a força de arrasto viscoso.

2.4 MEIO GRANULAR

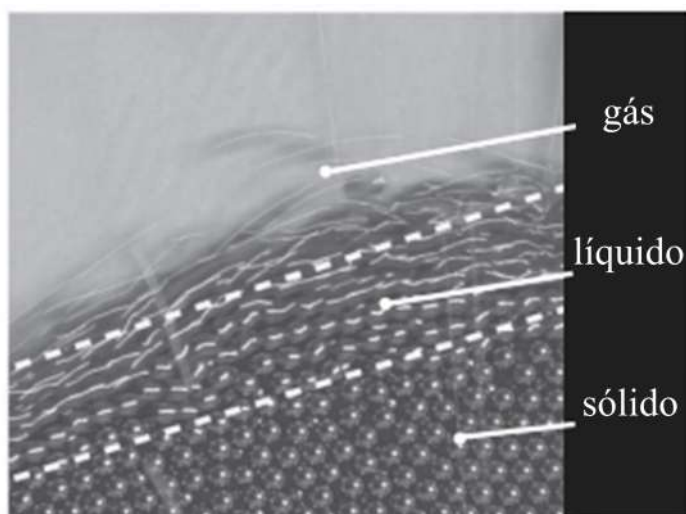
O leito de cascalho se caracteriza como meio granular, ou seja, um aglomerado de partículas distintas que possuem muitos graus de liberdade, sendo as interações entre as partículas geralmente irreversíveis e não lineares (DURAN, 2012; HERRMANN et al., 2013).

Segundo Andreotti et al. (2013), não há estrutura teórica disponível para se descrever a variedade de comportamentos observados de meios granulares, mesmo em casos de meios constituídos por partículas esféricas idênticas. Andreotti et al. (2013) listaram diversas dificuldades encontradas ao se trabalhar com materiais granulares como:

- Grande quantidade de partículas;
- Ausência de separação de escala entre a escala microscópica (dimensão do grão) e a escala macroscópica (dimensão do escoamento);
- Complexidade das interações entre as partículas;
- Facilidade do meio granular em dissipar energia;
- Meios granulares podem exibir diferentes comportamentos da matéria.

O meio granular pode se comportar de diferentes maneiras. Na Figura 2.4 observa-se que o comportamento do meio granular pode ser igual ao meio sólido, líquido ou gasoso. As partículas podem manter tensões e criar um pilha estática, mas também podem escoar como líquido ou se comportar como gás quando são fortemente agitadas (ANDREOTTI et al., 2013). Além disso, os diferentes regimes de escoamento podem coexistir em uma única configuração como mostra a Figura 2.4 pelo escoamento de grãos em uma pilha.

Figura 2.4 – Os diferentes comportamentos do meio granular, como sólido, líquido ou gás.



Fonte: Adaptado de Andreotti et al. (2013).

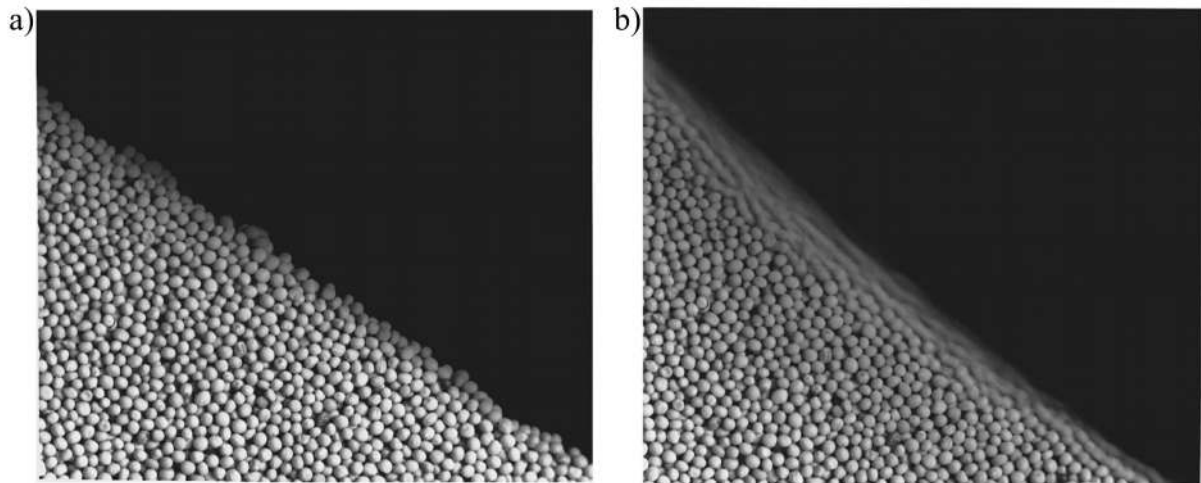
A seguir são apresentados alguns parâmetros que caracterizam o meio granular e que podem ser associados aos fenômenos presentes durante a deformação do leito de cascalhos devido ao deslocamento do conjunto broca e coluna de perfuração.

2.4.1 ÂNGULO DE REPOUSO

Fisicamente, o ângulo de repouso pode ser definido como o ângulo que distingue a transição entre fases do meio granular. Outra definição geralmente utilizada, segundo Al-Hashemi e Al-Amoudi (2018) é a de que o ângulo de repouso representa a inclinação mais acentuada de material não confinado, medida do plano horizontal em que o material pode ser empilhado sem colapsar.

Na Figura 2.5 observa-se o fenômeno de transição entre fases do meio granular representado por uma pilha de sementes de mostarda. Quando a inclinação da pilha é menor do que o ângulo de repouso, Figura 2.5(a), o material se comporta como um sólido, ou seja, o material permanece em repouso apesar da força gravitacional criar tensões macroscópicas na superfície. Na situação em que a pilha possui inclinação maior que o ângulo de repouso, Figura 2.5(b), os grãos começam a escoar. De acordo com Jaeger et al. (1996) e mostrado na Figura 2.5(b), o escoamento do meio granular não é como o de fluido comum, ocorrendo em apenas uma camada na superfície da pilha, sem movimento no restante do volume.

Figura 2.5 – (a) Pilha de sementes de mostarda empilhadas com um ângulo menor que o ângulo de repouso. (b) A mesma pilha após a inclinação ser aumentada suavemente para criar uma avalanche.

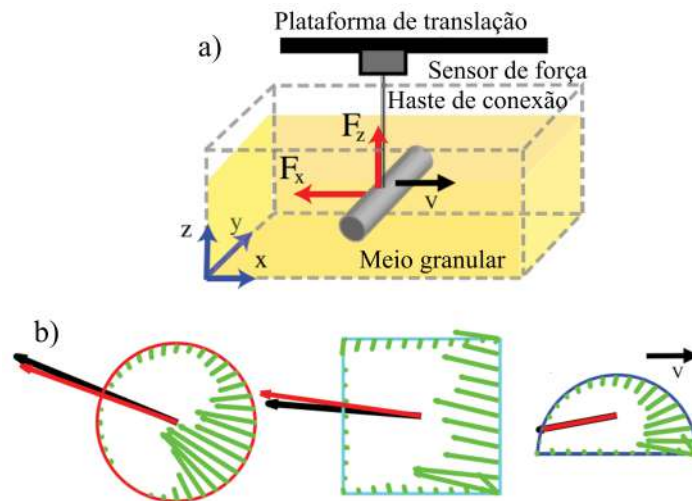


Fonte: Adaptado de Jaeger et al. (1996).

2.4.2 ARRASTO EM MEIO GRANULAR

O movimento de objetos imersos em meio granular foi estudado por Ding et al. (2011) através de experimentos e simulações. Os autores observaram que os objetos são submetidos a forças de arrasto opostas e perpendiculares à direção do movimento. Na Figura 2.6(a) é apresentada a configuração do experimento realizado por Ding et al. (2011) em que objetos submersos em leito de esferas de vidro são deslocados lateralmente com velocidade constante de $v = 10 \text{ cm/s}$. As esferas de vidro possuem diâmetro de $0,32 \pm 0,02 \text{ cm}$ e densidade $2,47 \text{ g/cm}^3$ e as áreas transversais dos objetos (circular, quadrada e semi-circular) deslocados são mostradas na Figura 2.6(b).

Figura 2.6 – (a) Ilustração do experimento realizado por Ding et al. (2011) em que um objeto é movimentado através do meio granular. (b) Representação das forças resultantes obtidas experimentalmente em preto, simuladas em vermelho para cada forma e em verde as forças obtidas pela simulação na superfície de cada objeto.

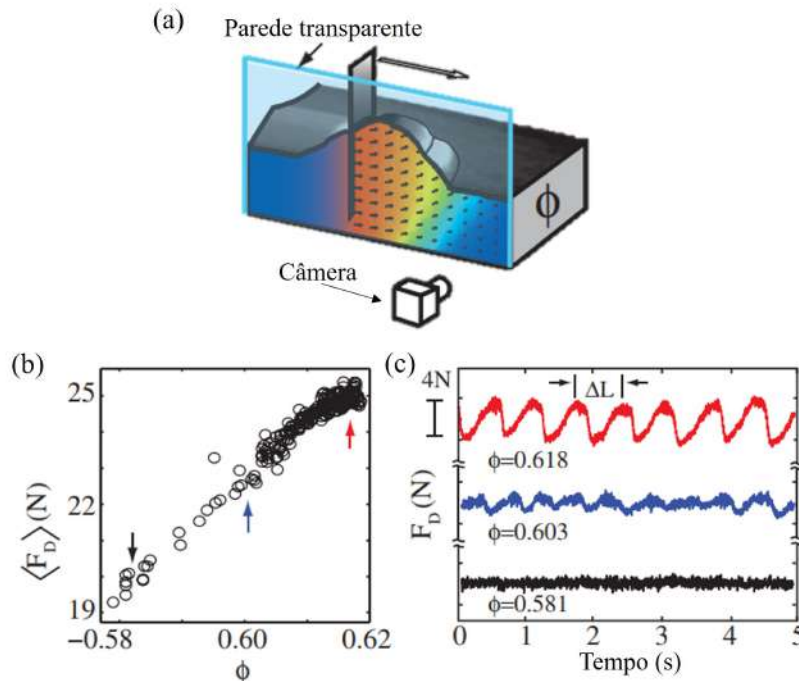


Fonte: Adaptado de Ding et al. (2011).

A força resultante medida experimentalmente é representada pela seta preta na Figura 2.6(b), já a força resultante da simulação pela seta vermelha e as forças na superfície dos objetos são representadas pelas setas verdes. Ding et al. (2011) constataram que para todas as formas avaliadas, as forças são maiores na face que está a frente do movimento e que a magnitude da força local foi determinada principalmente pela orientação da superfície. Como pode-se observar na Figura 2.6(b), conforme a tangente da superfície local se alinha com a velocidade do objeto a magnitude da força se torna menor, ou seja, superfícies orientadas paralelamente à direção do movimento contribuem pouco na força de arrasto.

Gravish et al. (2010) e Gravish et al. (2014) estudaram o deslocamento de uma placa imersa em leito de esferas de vidro com diâmetro de $256 \pm 44 \mu m$ e densidade $2,51 g/cm^3$. Na Figura 2.7(a) é possível observar a representação do experimento realizado.

Figura 2.7 – (a) Ilustração do experimento realizado por Gravish et al. (2010) em que uma placa é movimentada em meio granular. (b) Força de arrasto média, $\langle F_D \rangle$, cresce linearmente em relação a fração volumétrica, ϕ . (c) Oscilações temporais em F_D se tornam periódicas à medida que ϕ aumenta.

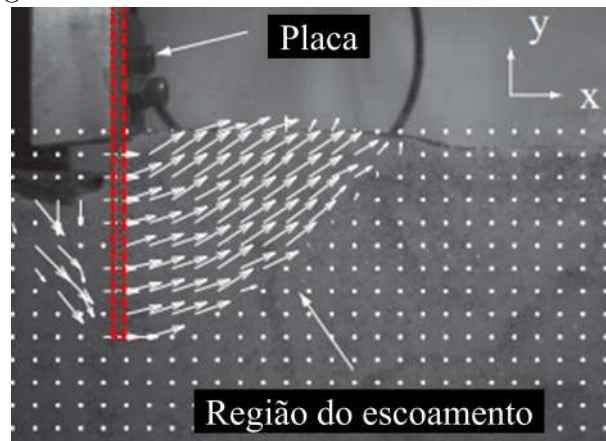


Fonte: Adaptado de Gravish et al. (2010).

Gravish et al. (2010) observaram que a variação da fração volumétrica (ϕ) muda a estrutura de empacotamento local dos grãos afetando o escoamento e a dinâmica da força de resposta do material. No gráfico da Figura 2.7(b), Gravish et al. (2010) mostram que a força de arrasto média ($\langle F_D \rangle$) cresce linearmente em relação a ϕ . No entanto, de acordo com os autores, diferenças ocorrem nas oscilações da força, como mostra a Figura 2.7(c). Para valores baixos de ϕ (linha preta), a força de arrasto F_D apresenta pequena amplitude, alta frequência e é independente de ϕ . Já para maiores valores de ϕ , (linhas azul e vermelha) observa-se que as oscilações de F_D crescem em duração e magnitude e aumenta com ϕ .

Além das oscilações na força de arrasto, Gravish et al. (2014) observaram que em geral, independente da variação de ϕ , o escoamento das partículas ocorre na região em frente ao movimento da placa e possui a forma de cunha, como mostra a Figura 2.8. De acordo com os autores o padrão de escoamento observado na Figura 2.8 é compatível com o modo de falha do meio granular tipo cunha de Coulomb. Observações similares do padrão de escoamento também foram reportadas por Gravish et al. (2010), Ding et al. (2011) e Kobayakawa et al. (2018).

Figura 2.8 – Campo de velocidade das partículas devido ao deslocamento da placa imersa no meio granular.



Fonte: Adaptado de Gravish et al. (2014).

Kobayakawa et al. (2018) estudaram numericamente o comportamento do meio granular ao deslocamento de uma placa utilizando o método dos elementos discretos (DEM). As simulações foram baseadas no experimento realizado por Gravish et al. (2014), sendo a única diferença o diâmetro das partículas utilizadas na simulação; três vezes maiores do que as do experimento. Os resultados obtidos por Kobayakawa et al. (2018) mostraram que, como no trabalho experimental de Gravish et al. (2014), a força de arrasto cresce linearmente com ϕ e apresenta diferentes oscilações dependendo do valor de ϕ . Apesar da simulação permitir a investigação a nível microscópico do grão, o tempo computacional é elevado. De acordo com os autores a simulação do caso com maior número de partículas (33×10^6 partículas) demorou 10 dias para o deslocamento de 350 mm da placa.

2.4.3 GRADIENTE DE PRESSÃO EM MEIO GRANULAR

O escoamento de fluido através do leito empacotado, como observado por Rasi et al. (1994) e representado na Figura 2.2(b), produz diferenças de pressão. As diversas correlações encontradas na literatura para o cálculo da queda de pressão em leitos compactados são derivações da Lei de Darcy (CARMAN, 1937).

Uma das primeiras correlações a propor o conceito de fator de atrito para o cálculo da queda de pressão em leito granular foi desenvolvida por Ergun e Orning (1949). Para elaborar a correlação, os autores realizaram experimentos do escoamento de gás através de leito compactado para diferentes formas de partículas. Os autores observaram que a razão do gradiente de pressão e da velocidade superficial do fluido em leito compactado é função do fluxo de massa do fluido e envolvem constantes como o formato da partícula, a fração volumétrica de vazios e viscosidade do fluido.

A correlação proposta por Ergun e Orning (1949) foi analisada por Allen et al. (2013). Os autores observaram que a correlação de Ergun e Orning (1949) não pode ser

utilizada para prever a queda de pressão em leitos empacotados de esferas uniformes, apresentando valores superestimados da queda de pressão.

Além de Ergun e Orning (1949), outros autores como Hicks (1970), Jones e Krier (1983) e Montillet et al. (2007) apresentaram correlações para o cálculo do gradiente de pressão em leito compactado para diferentes faixas do número de Reynolds e formatos de partículas. As correlações desenvolvidas por Ergun e Orning (1949), Hicks (1970) e Jones e Krier (1983) foram obtidas através da comparação com experimentos utilizando gás como fluido que escoava pelo leito compactado. No caso de Montillet et al. (2007), a correlação foi obtida por experimentos realizados com água e soluções aquosas de glicerina.

2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Na revisão bibliográfica foi apresentado primeiramente os modelos de T&D existentes. Em seguida, os trabalhos que estudaram experimentalmente a movimentação da coluna de perfuração em escala laboratorial imersa em leito de cascalho foram apresentados. Na sequência foi abordado os esforços devido ao arrasto hidrodinâmico e as propriedades dos materiais granulares. A partir da revisão bibliográfica, pode-se destacar as seguintes informações:

- A modelagem de T&D encontrada na literatura não contabiliza a presença de leito de cascalhos no equacionamento das forças;
- A força de arrasto depende de variáveis como: área transversal da broca, altura inicial do leito, tipo de cascalho e inclinação do poço (RASI et al., 1994);
- A utilização de um único fator de atrito, para o cálculo das forças de arrasto não é capaz de prever o aumento da força associado ao acúmulo de cascalho no interior do poço (FAZAELIZADEH, 2013);
- O meio granular possui características que podem ser relacionadas ao comportamento do leito de cascalhos como:
 - O ângulo de repouso do meio granular pode ser associado ao modo como os cascalhos se acomodam nas regiões de maior diâmetro do BHA;
 - Apenas as partículas na região em frente ao movimento do objeto imerso no meio granular escoam (GRAVISH et al., 2014);
 - Superfícies orientadas paralelamente à direção do movimento do objeto contribuem pouco na força de arrasto (DING et al., 2011);
 - A diferença de pressão devido ao escoamento em um leito compactado depende do formato, tamanho e disposição das partículas, da fração volumétrica de vazios e da viscosidade do fluido (ERGUN; ORNING, 1949).

Como foi verificado na revisão da literatura a presença de leito de cascalhos é um problema que pode ser detectado pelo acompanhamento das forças de arrasto sobre a coluna. Porém os modelos de T&D revisados não são capazes de prever o aumento na força de arraste devido a presença de leito de cascalhos. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo específico contribuir com esta carência, analisando os esforços sobre a coluna de perfuração devido a interação leito-fluido-equipamentos e propondo um modelo para o cálculo desses esforços.

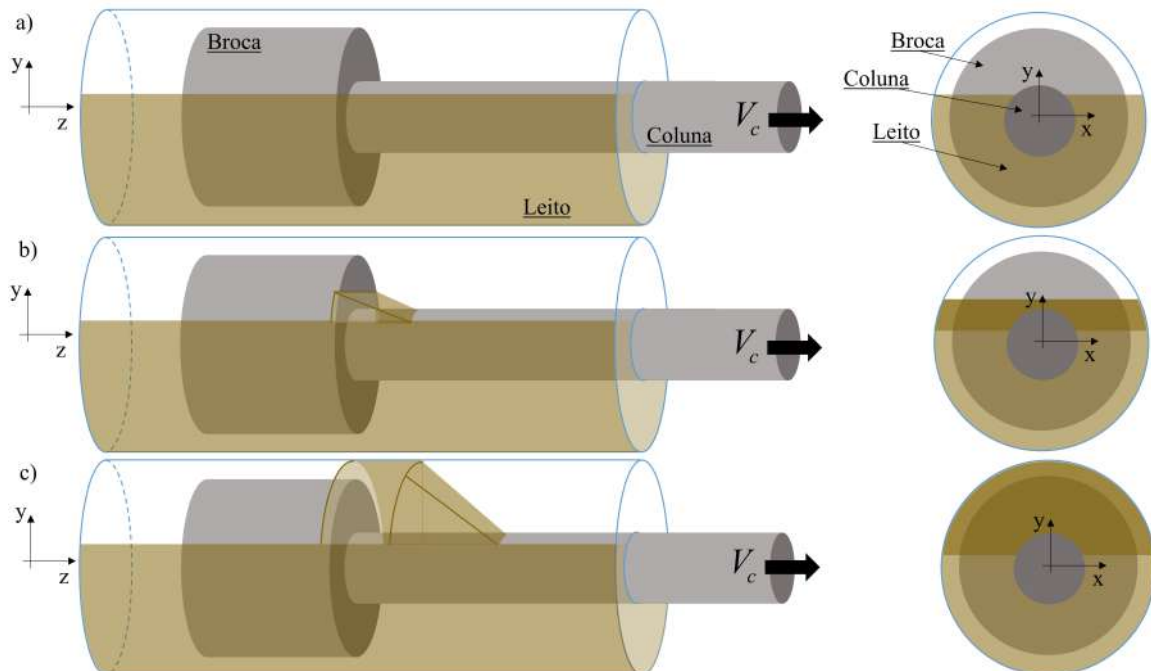
3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo é descrito o modelo matemático desenvolvido para análise dos esforços sobre o conjunto coluna-broca gerados devido ao deslocamento axial dos equipamentos na presença de leito de cascalhos. O modelo matemático é estruturado em duas etapas. A primeira etapa, apresentada na Seção 3.1, é baseada na equação da conservação da massa. A análise do crescimento da pilha de cascalho e a formação do plugue durante o deslocamento da coluna são verificadas. Na segunda etapa, Seção 3.2, são analisadas as forças sobre o conjunto coluna-broca através da equação da quantidade de movimento. Forças oriundas da interação leito-fluido-equipamento são investigadas e detalhes são apresentados nas Subseções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3

A modelagem matemática apresentada é baseada nos estágios observados experimentalmente por Peliano (2018) apresentados a Figura 3.1.

Figura 3.1 – Representação dos estágios observados experimentalmente por Peliano (2018).

- (a) Conjunto coluna-broca se deslocam com velocidade (V_c) constante imerso em leito de cascalho com altura constante. (b) Formação da pilha de cascalho. (c) Anular totalmente obstruído e crescimento do plugue.



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, admite-se que o conjunto coluna-broca está imerso em um leito de cascalhos com altura constante e é deslocado com velocidade constante V_c , como ilustrado na Figura 3.1(a). Em seguida, Figura 3.1(b), observa-se o acúmulo de cascalhos na região em frente a broca, formando uma pilha de cascalhos. Conforme a velocidade de desloca-

mento do conjunto, a altura do leito e a área transversal da broca a pilha de cascalhos pode crescer até a obstrução do anular e formação de um plugue, como ilustra a Figura 3.1(c).

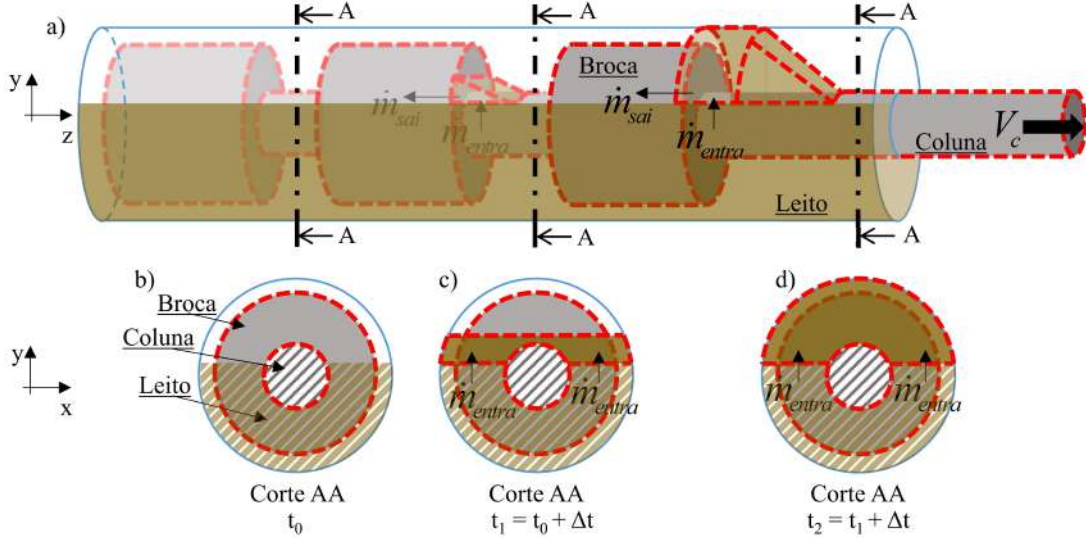
As principais hipóteses adotadas para a modelagem são listadas abaixo. Hipóteses adicionais são apresentadas ao longo do capítulo.

- Área transversal da broca circular (diâmetro constante);
- Velocidade de deslocamento do conjunto coluna-broca (V_c) constante;
- Altura do leito inicialmente uniforme e constante;
- Vazão de fluido e cascalhos constante;
- Cascalho perfeitamente esférico;
- Não são considerados efeitos de anisotropia no meio granular;
- Conjunto coluna-broca se desloca sem rotação.

3.1 CÁLCULO DO ACÚMULO DE CASCALHO

Como o objetivo do presente trabalho é contabilizar os esforços sobre o conjunto coluna-broca devido a interação com o leito de cascalho, admite-se como volume de controle o conjunto coluna-broca juntamente com a quantidade de cascalho acumulada e arrastada pela broca. O volume de controle do problema estudado está representado pelas linhas tracejadas em vermelho na Figura 3.2.

Figura 3.2 – (a) Representação da evolução do acúmulo de cascalhos na região em frente a broca que se desloca junto com o conjunto coluna-broca. Representação da seção transversal (b) no instante inicial t_0 , (c) no instante t_1 com acúmulo de cascalho e (d) no instante t_2 em que há formação de plugue.



Fonte: Autoria própria.

Durante o deslocamento do conjunto coluna-broca imersa em leito de cascalho, ocorre o acúmulo de cascalhos na região em frente a broca, como ilustrado na Figura 3.2. A massa de cascalho acumulada se desloca com o conjunto no instante t_1 (Figura 3.2(c)), podendo crescer até obstruir o espaço anular como mostra o instante t_2 na Figura 3.2(d).

Para quantificar os cascalhos que se acumulam na região em frente a broca foi utilizada a equação da conservação da massa, apresentada na Equação 3.1.

$$\frac{\partial M_{VC}}{\partial t} = \sum_{entra} \dot{m} - \sum_{sai} \dot{m} \quad (3.1)$$

sendo M_{VC} a massa acumulada no volume de controle, t o tempo, os \dot{m} são as vazões mássicas associadas ao escoamento de cascalho que entra e sai do volume de controle.

Quando a vazão de massa que sai do volume de controle for maior que a vazão mássica que entra, não ocorre obstrução do espaço anular, mas apenas formação de uma pilha de cascalho em frente a broca, como ilustrado na Figura 3.2(c). Já na situação em que a vazão mássica de cascalho que entra no volume de controle for maior que a vazão mássica que sai, a deposição de cascalhos irá aumentar ocasionando crescimento da pilha e formação do plugue, como representado na Figura 3.2(d)

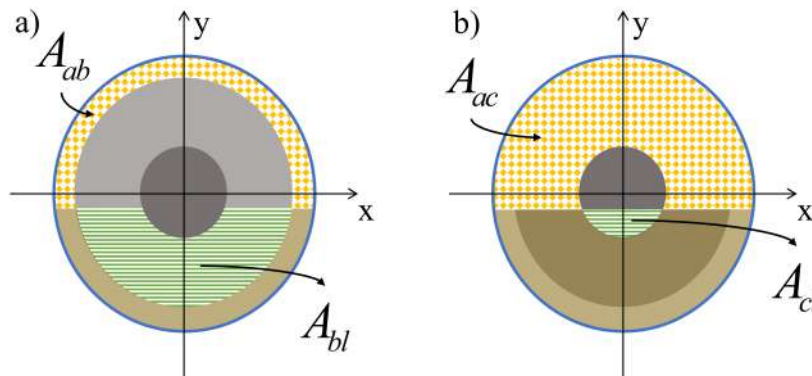
A vazão mássica de cascalho que entra no volume de controle é calculado pela Equação 3.2:

$$\dot{m}_{entra} = (1 - \epsilon)\rho_s Q_{entra} = (1 - \epsilon)\rho_s A_{bl} V_c \quad (3.2)$$

em que ϵ é a fração de vazios ou fração de volume ocupado pelo líquido, ρ_s é a massa

específica dos cascalhos, Q_{entra} é a vazão volumétrica que entra no volume de controle. Note que a vazão Q_{entra} iguala-se à vazão mássica de cascalho deslocada pela broca, que pode ser calculada pelo produto da área da broca imersa no leito, A_{bl} (área verde hachurada na Figura 3.3(a)) multiplicada pela velocidade de deslocamento do conjunto coluna-broca, V_c .

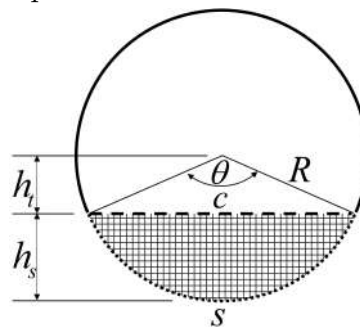
Figura 3.3 – Representação (a) da área da broca imersa no leito, A_{bl} (hachurado verde) e área aberta na região da broca, A_{ab} (quadriculado amarelo), (b) da área da coluna imersa no leito, A_{cl} (hachurado verde) e área aberta na região da coluna, A_{ac} (quadriculado amarelo).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3.3 ainda destaca-se a área da coluna imersa no leito, A_{cl} , a área aberta na região da broca, A_{ab} e a área aberta na região da coluna, A_{ac} . A A_{bl} foi obtida a partir do cálculo da área de um segmento circular, bem como as áreas transversais A_{ab} , A_{ac} e A_{cl} . Na Figura 3.4 é apresentado um segmento circular delimitado por uma secante ($c = R\sqrt{2 - 2\cos(\theta)}$), representada pela linha tracejada e por um arco de circunferência ($s = R\theta$), em que R é o raio do círculo, h_t a altura da base do segmento circular, h_s a altura do segmento circular e θ o ângulo do segmento circular.

Figura 3.4 – Representação do segmento circular destacado pela região quadriculada e as variáveis utilizadas para o cálculo da área do segmento.



Fonte: Autoria própria.

A área do segmento circular, região quadriculada na Figura 3.4, é calculada pela

seguinte expressão:

$$A_{sc} = \frac{R^2}{2}(\theta - \text{sen}(\theta)) \quad (3.3)$$

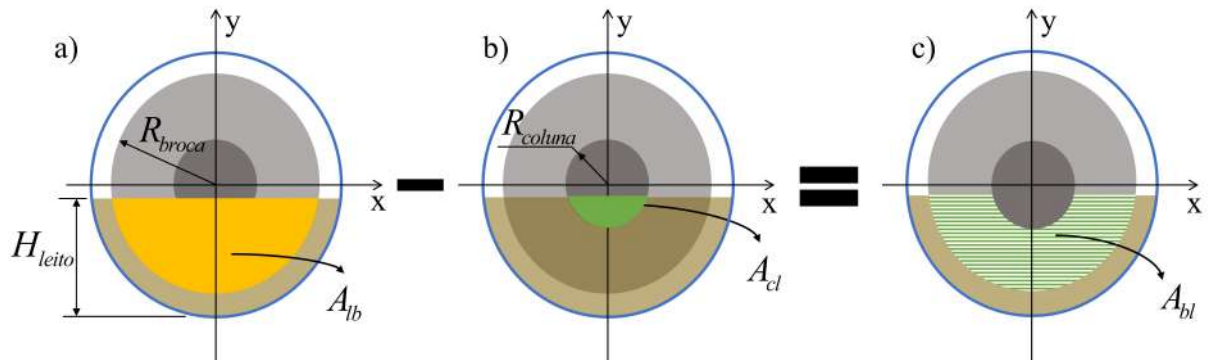
no qual θ é obtido por:

$$\theta = 2\arccos\left(\frac{h_t}{R}\right) \quad (3.4)$$

sendo $h_t = R - h_s$. Para o problema estudado θ foi calculado considerando h_s igual a altura do leito de cascalhos, H_{leito} e R o raio do poço, $R_{poço}$.

Quando a coluna está imersa no leito de cascalhos a área A_{bl} é obtida como esquematizado na Figura 3.5 a partir da área transversal do leito, A_{lb} (em amarelo Figura 3.5(a)) ocupada pela broca menos a área transversal da coluna imersa no leito, A_{cl} (em verde Figura 3.5(b)), resultando na Equação 3.5.

Figura 3.5 – Representação do volume de cascalhos, V_{sai} , que sai do volume de controle.



Fonte: Autoria própria.

$$A_{bl} = \left(\frac{R_{broca}^2}{2} - \frac{R_{coluna}^2}{2} \right) (\theta - \text{sen}(\theta)) \quad (3.5)$$

A equação para o cálculo das demais áreas: A_{ab} , A_{ac} e A_{cl} são apresentadas na Tabela 3.1 e serão utilizadas posteriormente durante a modelagem.

Tabela 3.1 – Equações para o cálculo das áreas A_{ab} , A_{ac} e A_{cl} .

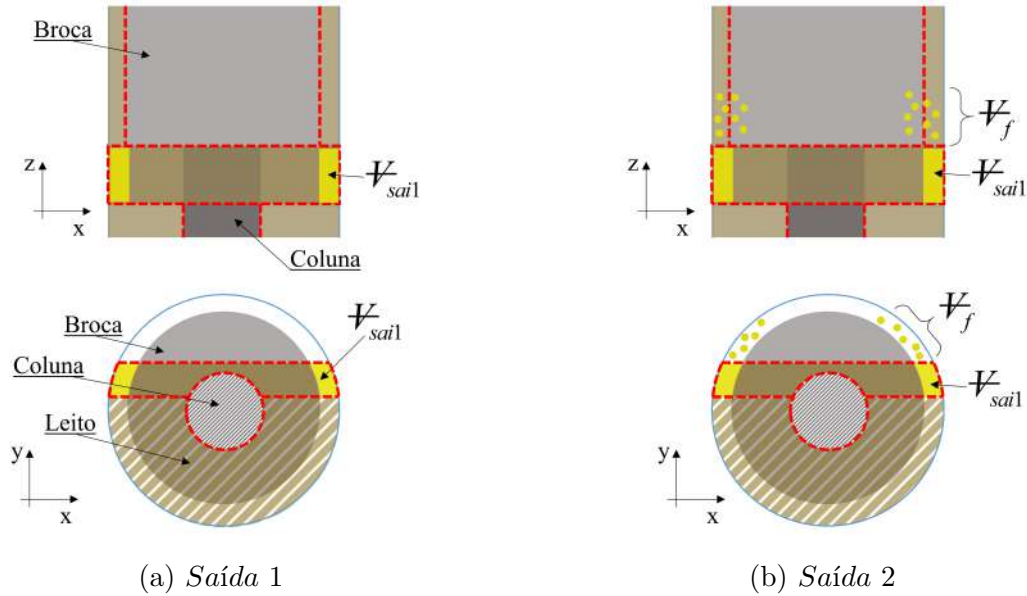
Área	Equação
A_{ab}	$\pi R_{poço}^2 - \pi R_{broca}^2 - \left(\frac{R_{poço}^2}{2} - \frac{R_{broca}^2}{2} \right) (\theta - \text{sen}(\theta))$ (3.6)
A_{ac}	$\pi R_{poço}^2 - \pi R_{coluna}^2 - \left(\frac{R_{poço}^2}{2} - \frac{R_{coluna}^2}{2} \right) (\theta - \text{sen}(\theta))$ (3.7)
A_{cl}	$\frac{R_{coluna}^2}{2} (\theta - \text{sen}(\theta))$ (3.8)

Para o cálculo da vazão de massa de cascalho que sai do volume de controle foram admitidas duas hipóteses. A primeira hipótese considera que a quantidade de cascalhos que sai do volume de controle, V_{sai1} , se encontra na região entre a broca e a parede do poço, calculada pela Equação 3.9:

$$V_{sai1} = V_{pilha} - V_{pilha/broca} \quad (3.9)$$

sendo V_{pilha} o volume de cascalhos total da pilha e $V_{pilha/broca}$ o volume de cascalhos que se encontra em frente a broca. Como representado na Figura 3.6(a) denominada como *Saída 1*.

Figura 3.6 – Representação da quantidade de cascalhos que sai do volume de controle em (a) *Saída 1* = \mathcal{V}_{sai1} considerando apenas o volume que se encontra entre a broca e a parede do poço e (b) *Saída 2* = $\mathcal{V}_{sai1} + \mathcal{V}_f$ considerando o carregamento de cascalhos pelo fluido.



Fonte: Autoria própria.

A segunda hipótese denominada *Saída 2* considera também a saída de cascalhos carregados pelo fluido, como ilustra a Figura 3.6(b). Logo, para a *Saída 2* a quantidade de cascalhos que sai do volume de controle é calculada pela Equação 3.10:

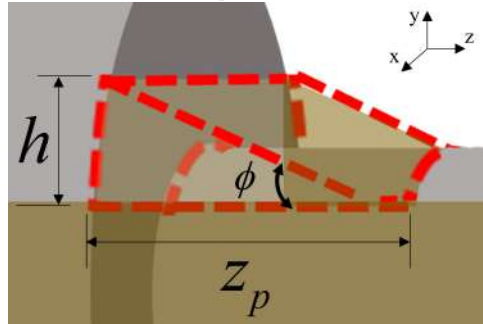
$$\mathcal{V}_{sai2} = \mathcal{V}_{sai1} + \mathcal{V}_f \quad (3.10)$$

no qual \mathcal{V}_f é o volume de cascalho carregado pelo fluido, sendo proporcional a velocidade do fluido, V_f , obtido pela Equação 3.10:

$$\mathcal{V}_f = (V_f/V_c)\mathcal{V}_{sai1} \quad (3.11)$$

A quantidade de cascalhos que sai do volume de controle é calculada a partir do volume da pilha de cascalhos. O crescimento da pilha de cascalho em frente a broca é função da taxa de acúmulo de cascalho no volume de controle. Dito isso, pode-se representar a pilha formada pelas dimensões ilustrada na Figura 3.7. Sendo h e z_p a altura e o comprimento da pilha respectivamente e ϕ o ângulo de repouso dos cascalhos que será especificado.

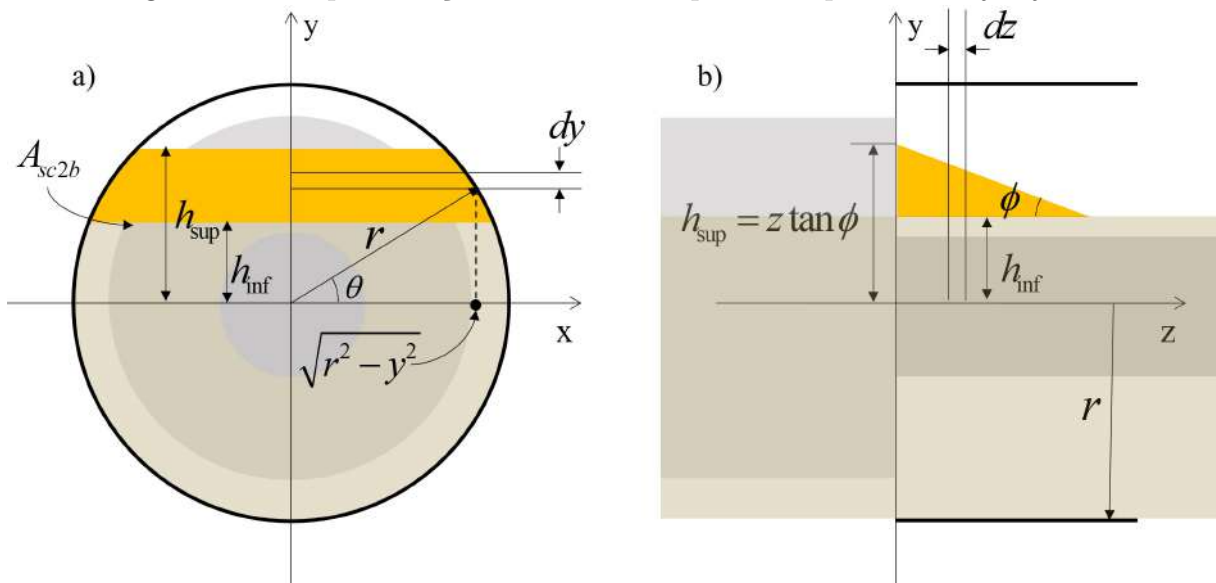
Figura 3.7 – Representação da pilha formada pelo acúmulo de cascalhos em frente a broca, com altura h , comprimento z_p e ângulo de repouso ϕ .



Fonte: Autoria própria.

No modelo é considerado que o volume de cascalhos da pilha é conhecido para cada instante de tempo. Desta forma os valores de z_p e h são calculados de modo iterativo a partir do cálculo do volume delimitado pelas áreas destacadas em amarelo na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Representação do volume da pilha nos planos $x - y$ e $y - z$.



Fonte: Autoria própria.

A área transversal da pilha é igual a área do segmento circular de duas bases, como pode-se observar na Figura 3.8(a). Desta forma, a área do segmento circular de duas bases (A_{sc2b}) é calculado pela expressão a seguir:

$$A_{sc2b} = \int_{h_{inf}}^{h_{sup}} 2\sqrt{r^2 - y^2} dy \quad (3.12)$$

em que h_{sup} e h_{inf} são as alturas da base superior e inferior respectivamente e r é o raio do círculo, como mostrado na Figura 3.8.

Resolvendo a integração da Equação 3.12 obtém-se:

$$A_{sc2b} = r^2 \arcsen \frac{h_{sup}}{r} + h_{sup} \sqrt{r^2 + h_{sup}^2} - r^2 \arcsen \frac{h_{inf}}{r} + h_{inf} \sqrt{r^2 + h_{inf}^2} \quad (3.13)$$

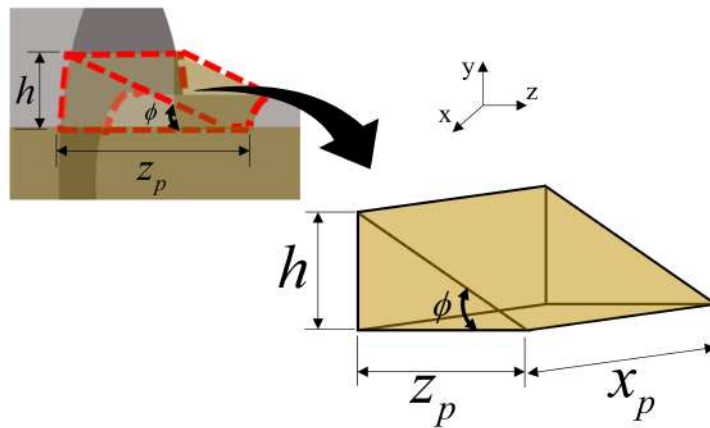
Tendo em vista que h_{inf} é fixo $h_{sup} = z \tan \phi$, o volume da pilha é calculado pela Equação 3.14.

$$V_{pilha} = \int A_{sc2b}(z, R_{poço}) dz \quad (3.14)$$

Os valores de z_p são então obtidos de forma iterativa a partir da Equação 3.14, visto que o volume da pilha é conhecido e h é obtido da relação $h = z \tan \phi$.

Para o início do cálculo iterativo de z_p e h o volume da pilha é aproximado pelo volume de um prisma triangular, como ilustrado na Figura 3.9.

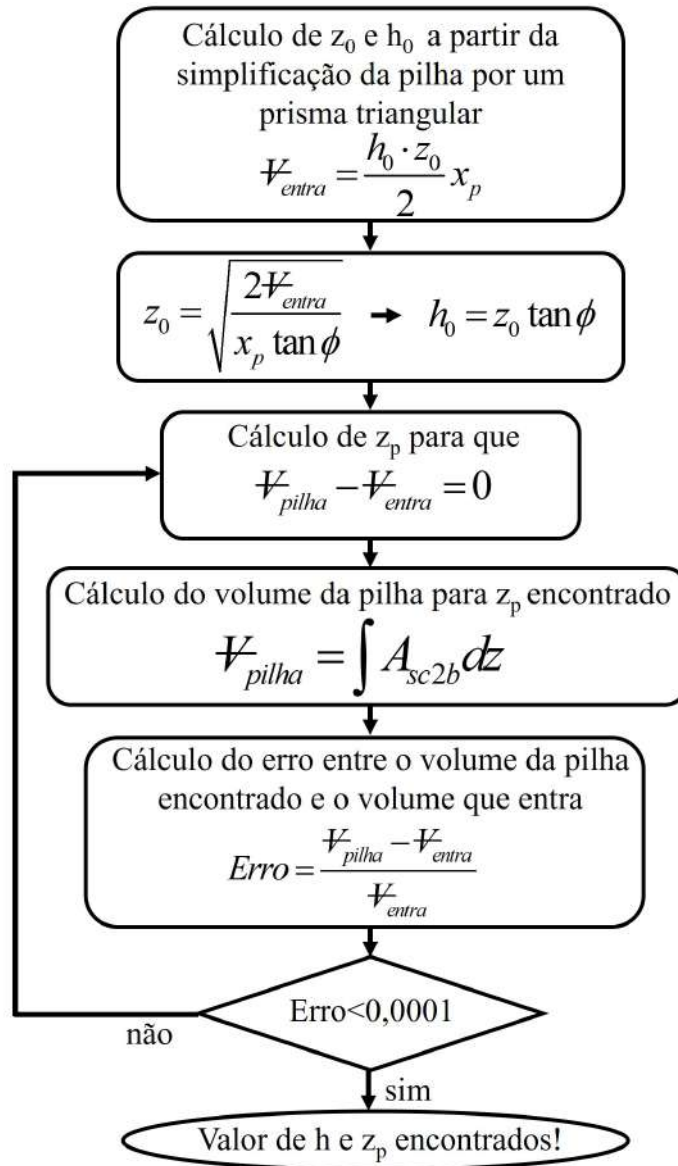
Figura 3.9 – Aproximação do volume da pilha por um prisma triangular para obtenção dos valores iniciais para o cálculo iterativo de z_p e h .



Fonte: Autoria própria

Conforme o diagrama de solução representado na Figura 3.10, os valores de iniciais de z_p e h (z_0 e h_0) são obtidos considerando o volume do prisma triangular igual ao volume de cascalho que entra no volume de controle. A partir do valor inicial de h_0 é calculado o valor de z_0 baseado em V_{entra} . Em seguida o volume da pilha é calculado a partir do valor de z_p inicial e da Equação 3.14. Na sequência, o Erro ($= (V_{pilha} - V_{entra})/V_{entra}$) é calculado e o processo se repete até que um valor menor que 0,0001 seja alcançado. Quando o critério é atingido h e z_p ficam definidos.

Figura 3.10 – Fluxograma do cálculo iterativo para obtenção dos valores de z_p e h para cada instante de tempo.



Fonte: Autoria própria.

Após encontrar os valores de h e z_p , é possível calcular a área transversal da pilha (A_p) a partir da Equação 3.13 e verificar se ocorre ou não a obstrução do espaço anular em cada instante de tempo. Posto que, quando a área transversal da pilha é igual a área aberta da broca (A_{ab} representada na Figura 3.3(a)) o espaço anular está totalmente obstruído e se inicia o crescimento do plugue. Concluída a verificação de formação da pilha ou plugue, a etapa de investigação das forças que atuam durante a movimentação da coluna, é apresentada a seguir.

3.2 CÁLCULO DAS FORÇAS SOBRE A BROCA E A COLUNA

O problema é analisado apenas na direção z , pois é a direção de maior contribuição das forças contrárias ao movimento do conjunto, como observado por Ding et al. (2011) ao deslocar diferentes objetos imersos em meio granular, apresentado no Capítulo 2 na Figura 2.6.

A força necessária para o deslocamento do conjunto coluna-broca (F_T) na presença de leito de cascalhos é obtida através da equação da quantidade de movimento, Equação 3.15.

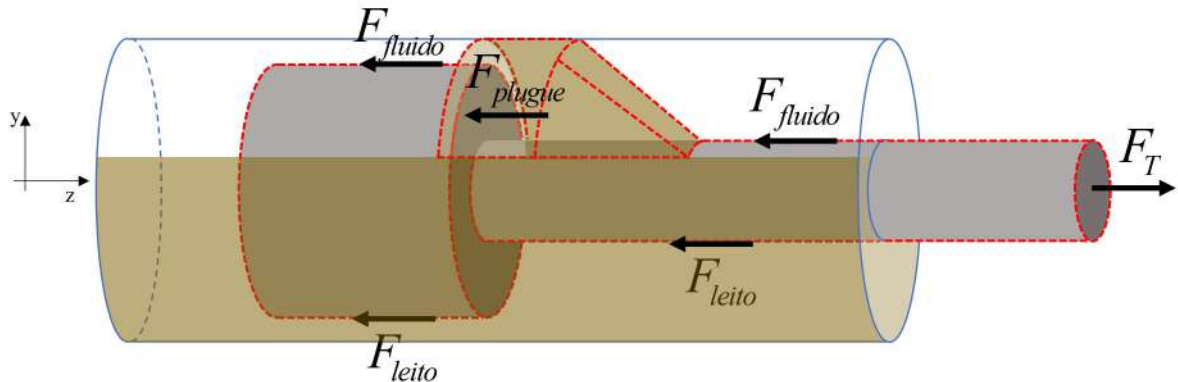
$$\frac{\partial(Mv_z)_{\forall C}}{\partial t} = F_T - \sum F_z - \left(\sum_{sai} \dot{m}v_z - \sum_{entra} \dot{m}v_z \right) \quad (3.15)$$

em que z é a direção escolhida para a análise, F_z são componentes das forças sobre o conjunto broca-coluna contrárias ao movimento do conjunto coluna-broca na direção z e v_z componentes das velocidades na direção z e F_T é a força de tração necessária para a movimentação do conjunto. Considerando v_z no volume de controle constante e igual à velocidade de deslocamento do conjunto coluna-broca V_c , e que a taxa de quantidade de movimento que entra no volume de controle na direção z é desprezível, como representado na Figura 3.2, a Equação 3.15 pode ser reescrita como:

$$F_T = \frac{\partial(M)_{\forall C}}{\partial t} V_c + \sum F_z + \sum_{sai} \dot{m}v_z \quad (3.16)$$

em que $\partial(M)_{\forall C}/\partial t$, é obtida pela Equação 3.1. O somatório de forças F_z representa as diferentes forças sobre a broca e a coluna de perfuração durante a movimentação axial, como pode ser observado na Figura 3.11 e pela Equação 3.17.

Figura 3.11 – Representação das forças sobre a broca e a coluna de perfuração durante a movimentação axial.



Fonte: Autoria própria.

$$\sum F_z = F_{fluido} + F_{leito} + F_{plugue} \quad (3.17)$$

No somatório estão presentes a força devido ao contato entre o conjunto de equipamentos e o leito de cascalhos (F_{leito}), a força de arrasto hidrodinâmico devido ao escoamento do fluido de perfuração (F_{fluido}) e também as forças associadas à formação do plugue (F_{plugue}), como o gradiente de pressão e o atrito entre o plugue e a parede do poço. Na seção seguinte, cada força citada é apresentada detalhadamente.

3.2.1 FORÇA DE ARRASTO HIDRODINÂMICO (F_{fluido})

A força F_{fluido} representa as forças de arrasto hidrodinâmicas que surgem devido ao movimento axial da coluna. Maidla et al. (1987) propuseram utilizar os cálculos de *surge* e *swab* para obter as pressões associada ao movimento axial da coluna. O procedimento de cálculo é baseado na teoria do arrasto viscoso para fluidos de Lei de Potência e de *Bingham* em um poço.

Para números de Reynolds menores que 10^5 , é possível empregar o conceito de fator de atrito de Fanning para o cálculo do gradiente de pressão na região anular, tanto para fluidos de Bingham quanto Lei de Potência (TVEITAN, 2011). A variação de pressão empregando o conceito de fator de atrito, é escrita, como (FONTENOT et al., 1974):

$$\frac{dP}{dz} = \frac{2f_a V_{ae}^2 \rho}{D_h} \quad (3.18)$$

no qual P é a pressão, ρ é a massa específica do fluido, f_a e V_{ae} são o fator de atrito e a velocidade efetiva do escoamento na região anular, D_h é o diâmetro hidráulico, calculado pela Equação 3.19:

$$D_h = \frac{4A_a}{P_a} \quad (3.19)$$

em que A_a é a área transversal aberta do espaço anular e P_a o perímetro da região aberta.

Para modelar o presente problema foi utilizado os fatores de atrito de Fanning para fluidos de Lei de Potência. De acordo com Fontenot et al. (1974), os fatores de atrito são calculados pelas seguintes expressões:

Para regime laminar ($Re \leq 3470 - 1370n$):

$$f_a = \frac{24}{Re} \quad (3.20)$$

Para região de transição ($3470 - 1370n < Re < 4270 - 1370n$):

$$f_a = \frac{16}{Re} + \left[\frac{Re - (3470 - 1370n)}{800} (f_{turb} - f_{lam}) \right] \quad (3.21)$$

E para regime turbulento ($Re \geq 4270 - 1370n$):

$$f_{turb} = \left\{ \frac{4}{n^{0,75}} \log \left[Re (f_{turb})^{1-\frac{n}{2}} \right] - \frac{0,4}{n^{1,2}} \right\}^{-2} \quad (3.22)$$

em que n é o índice de comportamento do fluido e Re o número de Reynolds, que para um fluido de Lei de Potência no espaço anular pode ser calculado pela seguinte expressão (FONTENOT et al., 1974):

$$Re = \frac{(D_h)^n V_{ae}^{2-n} \rho}{\frac{2}{3} m \left(\frac{2n+1}{2n}\right)^n 8^{n-1}} \quad (3.23)$$

na qual ρ é a densidade do fluido, m é o índice de consistência e n é o índice de Lei de Potência e V_{ae} é calculada pela Equação 3.24:

$$V_{ae} = \frac{Q_a}{A_a} + C_c V_c \quad (3.24)$$

em que Q_a é a vazão volumétrica do fluido no anular, $C_c V_c$ é a contribuição do arrasto provocado pela movimentação da coluna, sendo C_c o fator de aderência (*clinging factor*), calculado pela Equação 3.25:

$$C_c = \frac{\delta^2 - 1 - 2\ln(\delta)}{2(\delta^2 - 1)\ln\delta} \quad (3.25)$$

no qual $\delta = D_{poço}/D_{coluna}$.

A força de arrasto hidrodinâmico viscoso na região anular pode ser calculada por:

$$F_D = \Delta P A_a = \tau_{wp} A_{wp} + \tau_{wc} A_{wc} \quad (3.26)$$

no qual ΔP é a variação de pressão, A_a é a área transversal aberta do espaço anular, τ_{wp} e τ_{wc} são as tensões de cisalhamento na parede do poço e da coluna respectivamente, A_{wp} e A_{wc} são as áreas laterais do poço e da coluna em contato com o fluido, respectivamente.

As tensões de cisalhamento na parede do poço e da coluna são aproximadas por uma tensão de cisalhamento média, assim a Equação 3.26 pode ser reescrita como:

$$F_D = \Delta P A_a \approx \tau_{wm} (A_{wp} + A_{wc}) \quad (3.27)$$

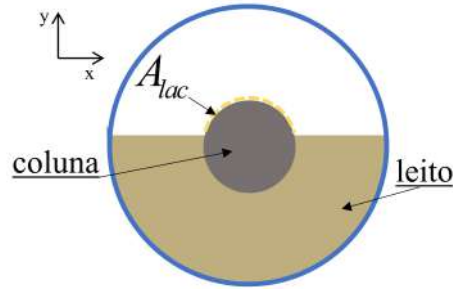
Logo, a tensão de cisalhamento média no espaço anular é obtida por:

$$\tau_{wm} \approx \frac{\Delta P A_a}{(A_{wp} + A_{wc})} \quad (3.28)$$

Considerando parte do espaço anular obstruído pela presença do leito de cascalho a força de arrasto hidrodinâmico viscoso, F_{fluido} , pode ser escrita como a Equação 3.29:

$$F_{fluido} = \tau_{wm} A_{lac} \quad (3.29)$$

em que τ_{wm} é a tensão de cisalhamento média e A_{lac} é a área lateral da região aberta da coluna, sem a presença do leito, representada na Figura 3.12 e calculada pela Equação 3.30.

Figura 3.12 – Representação da área lateral da região aberta da coluna, A_{lac} .

Fonte: Autoria própria

$$A_{lac} = (2\pi - \theta)(R_{coluna})L_c \quad (3.30)$$

no qual θ é o ângulo do arco que delimita o leito e L_c é o comprimento da coluna em contato com o fluido, calculado pela Equação 3.31:

$$L_c = L_{coluna} - (V_c t) - L_{plugue} \quad (3.31)$$

em que L_{coluna} é o comprimento da coluna, $V_c t$ é o comprimento da coluna que não está mais em contato com o fluido e L_{plugue} é o comprimento do plugue que será apresentado na subseção 3.2.3.

Assim sendo, F_{fluido} é obtida pela seguinte expressão:

$$F_{fluido} = \frac{\Delta P A_a}{(A_{wp} + A_{wc})} A_{lac} \quad (3.32)$$

Para a região da broca a força de arrasto hidrodinâmico é obtida da mesma forma.

3.2.2 FORÇA DE ATRITO ENTRE O CONJUNTO COLUNA-BROCA E O LEITO DE CASCALHO (F_{leito})

A força F_{leito} é originada pelo contato entre o conjunto e o leito, cujos efeitos podem ser calculados através das equações desenvolvidas por Maidla et al. (1987). Os autores propuseram um fator de correção aproximado que é baseado no diâmetro do poço e da tubulação para cada elemento da coluna, que é então aplicado ao fator de atrito. Ao se aplicar uma força normal (F_N) em um cilindro deslizando em um tubo de mesmo diâmetro a força de atrito, F_{leito} , é encontrada pela integração de pequenos elementos de pressão ao longo da superfície da área de contato. Nesse cenário os autores encontraram um fator de correção de $\frac{4}{\pi}$, significando que a força de arraste real é $\frac{4}{\pi}$ vezes maior do que se o tubo fosse arrastado ao longo de uma superfície plana, ou seja:

$$F_{leito} = \frac{4}{\pi} \mu_{leito} F_N \quad (3.33)$$

em que F_N é a força normal e assume o peso flutuado do elemento analisado. Sendo o peso flutuado da broca (Equação 3.34) ou da coluna (Equação 3.35):

$$W_{broca} = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_{broca}}\right) m_{broca}g \quad (3.34)$$

$$W_{coluna} = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_{coluna}}\right) m_{coluna}g \quad (3.35)$$

no qual ρ_f , ρ_{broca} e ρ_{coluna} é a densidade do fluido da broca e da coluna respectivamente, m_{broca} é a massa da broca, m_{coluna} é a massa da coluna e g a aceleração da gravidade.

No caso da tubulação da coluna de perfuração que possui diâmetro externo menor do que o diâmetro interno do poço, de acordo com Maidla et al. (1987) o fator de correção C_s aplicado, será menor do que $\frac{4}{\pi}$:

$$F_{leito} = C_s \mu_{leito} F_N \quad (3.36)$$

O autor propõe a Equação 3.37 para o cálculo do fator de correção C_s :

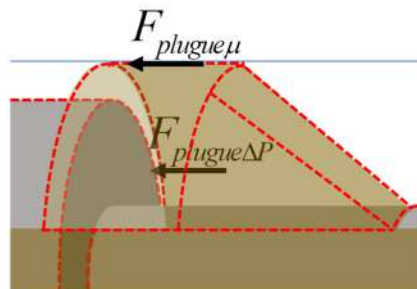
$$C_s = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{(D_{poço}^2 - D_{coluna}^2)^{\frac{1}{2}}}{D_{coluna}} \right) \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right) + 1 \quad (3.37)$$

Para a região da broca o diâmetro da coluna, D_{coluna} , é substituído pelo diâmetro da broca, D_{broca} .

3.2.3 FORÇA DE ARRASTO RELACIONADA AO PLUGUE (F_{plugue})

A força devido a formação do plugue, F_{plugue} , é composta pelo somatório das forças $F_{plugue\Delta P}$ devido ao gradiente de pressão, gerado pelo escoamento de fluido através do plugue e ao atrito entre o plugue e a parede do poço $F_{plugue\mu}$, como ilustrado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Representação das forças que surgem devido a formação do plugue. Sendo $F_{plugue\mu}$ a força de atrito entre o plugue e a parede do poço e $F_{plugue\Delta P}$ a força devido ao gradiente de pressão no plugue.



Fonte: Autoria própria.

A força de atrito entre o plugue e a parede do poço é calculada pela seguinte expressão:

$$F_{plugue\mu} = F_{Np}\mu_{plugue} \quad (3.38)$$

em que μ_{plugue} é o coeficiente de atrito entre o plugue a parede do poço e F_{Np} é a força normal gerada devido a pressão no interior do plugue, calculada pela Equação 3.39.

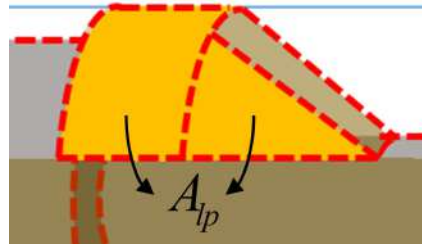
$$F_{Np} = \left(P_1 - \frac{\Delta P}{2} \right) A_{lp} \quad (3.39)$$

em que P_1 é a pressão hidrostática na extremidade do plugue, ΔP é a diferença de pressão devido ao plugue e A_{lp} é a área lateral do plugue, destacada em amarelo na Figura 3.14, calculada pela Equação 3.40:

$$A_{lp} = (2\pi - \theta)R_{poço}L_p + s_{pilha}z_p \quad (3.40)$$

em que s_{pilha} é o arco de círculo da pilha em contato com a parede do poço e z_p é o comprimento da pilha.

Figura 3.14 – Representação da área lateral do plugue, A_{lp} utilizada para o cálculo da força de atrito entre o plugue e a parede do poço.



Fonte: Autoria própria.

A força devido ao gradiente de pressão no plugue é calculada pela Equação 3.41:

$$F_{plugue\Delta P} = P_1A_{ac} - (P_1 - \Delta P)A_{ab} \quad (3.41)$$

no qual P_1 é a pressão hidrostática na extremidade do plugue, ΔP é a diferença de pressão devido ao plugue, A_{ac} é a área aberta acima do leito na região da coluna, A_{ab} é a área aberta acima do leito na região da broca, já identificadas na Figura 3.3.

A diferença de pressão associada ao empacotamento de partículas no plugue foi calculado a partir da correlação desenvolvida por Montillet et al. (2007). O autor propôs o seguinte fator de atrito para estimar a queda de pressão em um leito compactado:

$$f_M = a \left(\frac{D}{d_p} \right)^{0,20} \left(\frac{1000}{Re_p} + \frac{60}{Re_p^{0,5}} + 12 \right) \quad (3.42)$$

O valor de a é definido por Montillet et al. (2007) como sendo 0,061 para $\varepsilon < 0,4$ e 0,050 para $\varepsilon > 0,4$. Re_p é o número de Reynolds da partícula calculado através da

expressão:

$$Re_p = \frac{\rho v_s d_p}{\eta} \quad (3.43)$$

no qual η é a viscosidade do fluido e a velocidade superficial, v_s , é definida como:

$$v_s = \frac{\dot{m}}{\rho A_{cs}} \quad (3.44)$$

em que \dot{m} é a vazão mássica de fluido escoando através do leito empacotado e A_{cs} é a área transversal total do leito empacotado.

O diâmetro da partícula, d_p , é definido por Ergun (1952) em termos do volume da partícula e área superficial:

$$d_p = \frac{6 \sum V_p}{\sum A_p} \quad (3.45)$$

De acordo com Montillet et al. (2007) a Equação 3.42 é válida para $3,8 < D/d_p < 50$ e para $10 < Re_p < 2500$. Logo, a diferença de pressão no plugue pode ser obtida pela Equação 3.46:

$$\Delta P = \frac{f_M L_l \rho v_s^2 (1 - \varepsilon)}{D \varepsilon^3} \quad (3.46)$$

sendo ΔP a diferença de pressão, L_l o comprimento do leito compactado, ρ a massa específica do fluido, D o diâmetro da seção do leito e ε a fração de volume vazio.

O comprimento do leito compactado (L_l) utilizado neste problema para o cálculo da diferença de pressão no plugue é o comprimento do plugue (L_{plugue}). Foram assumidas duas hipóteses para o cálculo de L_{plugue} . A primeira hipótese calcula o comprimento do plugue considerando o comprimento máximo total da pilha ($Z_{máxPilha}$) como descrito na Equação 3.47 e representado na Figura 3.15(a):

$$L_{plugue} = \frac{(V_{entra} - V_{sai})}{A_{ac}} + Z_{máxPilha} \quad (3.47)$$

em que A_{ac} é a área aberta acima do leito na região da coluna e $Z_{máxPilha}$ é o comprimento máximo da pilha de cascalhos, obtido a partir do momento em que a pilha atinge sua altura máxima, obstruindo o espaço anular.

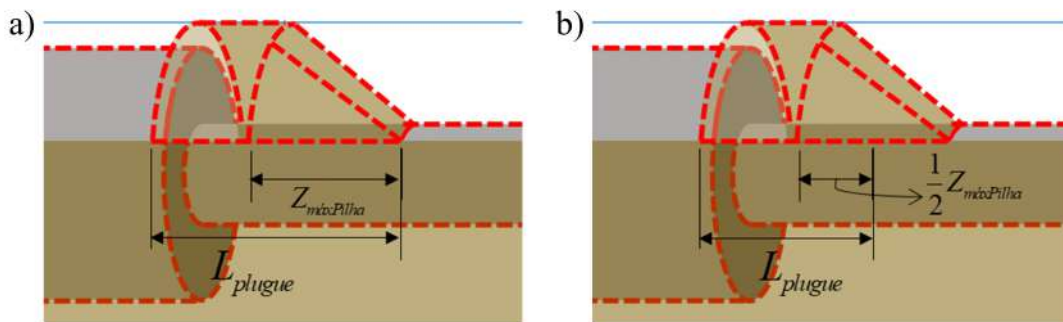
A segunda hipótese considera apenas metade do comprimento máximo da pilha ($1/2 Z_{máxPilha}$), como ilustrado na Figura 3.15(b) e representado pela Equação 3.48:

$$L_{plugue} = \frac{(V_{entra} - V_{sai})}{A_{ac}} + \frac{1}{2} Z_{máxPilha} \quad (3.48)$$

3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

No Capítulo 3 foi apresentado o modelo matemático desenvolvido. Primeiramente foi utilizada a equação da conservação da massa para calcular a quantidade de cascalho

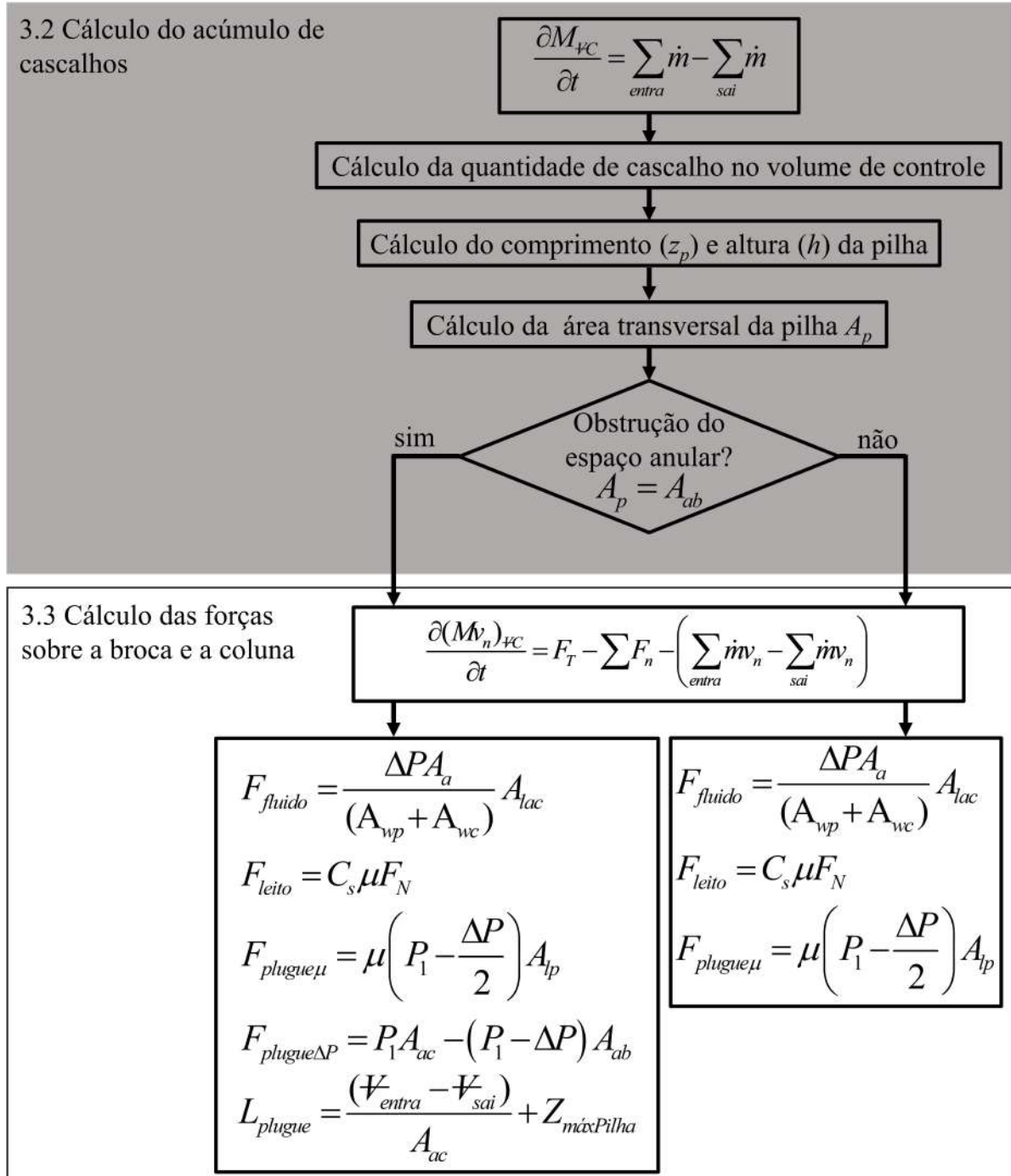
Figura 3.15 – (a) Comprimento do plugue, L_{plugue} , considerando o comprimento máximo da pilha, $Z_{máxPilha}$. (b) L_{plugue} considerando metade de $Z_{máxPilha}$.



Fonte: Autoria própria.

acumulada na região em frente a broca. Através da consideração de que o volume de cascalhos acumulado se distribui em forma de pilha com determinado ângulo de repouso foi possível calcular a área transversal ocupada pelos cascalhos e assim determinar se ocorre ou não a obstrução do espaço anular. Em seguida, empregando a equação da quantidade de movimento foi contabilizado os esforços sobre o conjunto coluna-broca. Cada força identificada foi calculada com o auxílio de expressões existentes na literatura. No cálculo da força de arrasto hidrodinâmico (F_{fluido}) foi empregado o modelo de Fontenot et al. (1974) para o cálculo do gradiente de pressão devido ao escoamento do fluido. A força de atrito entre o leito e os equipamentos F_{leito} foi calculada utilizando o fator de correção proposto por Maidla et al. (1987). As forças devido a formação do plugue foram divididas em duas: uma devido ao atrito entre o plugue e a parede do poço e outra devido à queda de pressão no plugue. A diferença de pressão no plugue foi obtida a partir da correlação desenvolvida por Montillet et al. (2007). A sequência de cálculo resumida das seções 3.1 e 3.2 é apresentada na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Fluxograma da sequência de cálculo resumido das seções 3.1 e 3.2



Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do modelo matemático proposto para os cálculos dos esforços sobre o conjunto coluna-broca. Na seção 4.1 as forças obtidas a partir do modelo matemático são comparadas com os resultados experimentais de Peliano (2018) para diferentes valores de velocidade de deslocamento do conjunto, altura do leito e área aberta. Em seguida é realizada a análise de sensibilidade do modelo a partir da variação do ângulo de repouso e coeficiente de atrito. Por fim é apresentado um estudo de caso no qual as forças devido a presença de leito de cascalho calculadas pelo modelo proposto são adicionadas forças de arrasto para a retirada da coluna em um poço real. O modelo matemático proposto foi implementado no software MATLAB® versão R2015a.

4.1 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A força de tração, F_T , necessária para o deslocamento do conjunto coluna-broca na presença de leito de cascalhos calculada pelo modelo é comparada com os resultados experimentais de Peliano (2018) em diferentes condições de operação.

O esquema da unidade experimental utilizada por Peliano (2018) é apresentado na Figura 4.1. O conjunto coluna-broca foi deslocado pelo servo motor com o auxílio das guias lineares, e a força de tração aplicada sobre a coluna foi medida através da célula de carga.

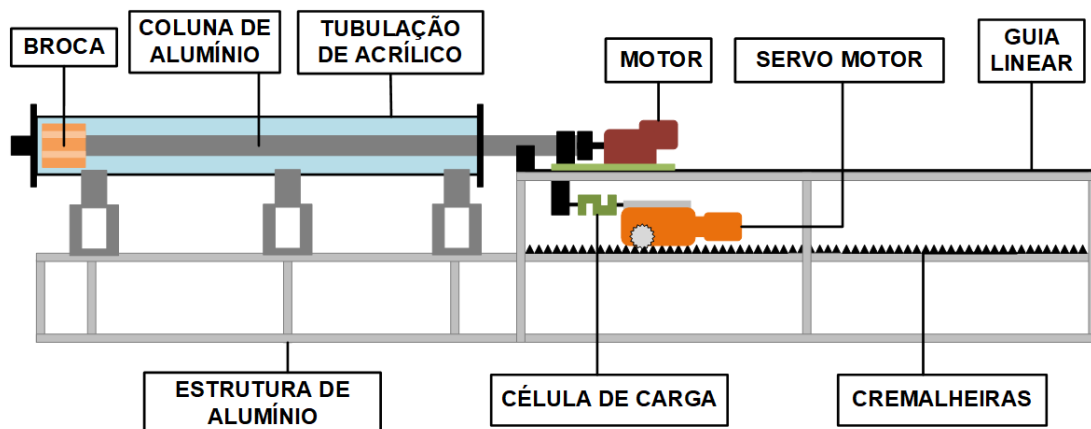


Figura 4.1 – Esquema da unidade experimental utilizada por Peliano (2018). (Peliano (2018))

Na Figura 4.2 é apresentada a seção de teste com os principais elementos. De acordo com Peliano (2018) os ensaios foram realizados em uma tubulação de acrílico, que representa as paredes do poço, para que fosse possível a visualização do comportamento do leito de cascalhos. A coluna de perfuração foi representada pela tubulação de alumínio

e a broca por uma peça usinada em polipropileno. O leito de cascalhos era composto por esferas de vidro e a sua montagem realizada pelas aberturas da tubulação, vedadas por tampas durante a realização dos testes.

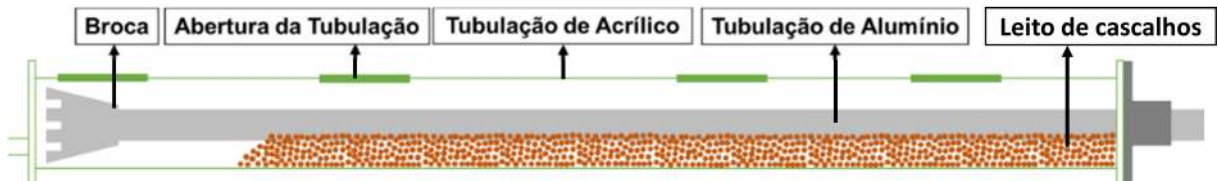


Figura 4.2 – Principais elementos da unidade experimental utilizada por Peliano (2018) para realização dos testes de deslocamento da coluna de perfuração imersa em leito de cascalhos. (Peliano (2018))

O comportamento da F_T é avaliada para os parâmetros estudados experimentalmente, sendo: velocidade de deslocamento do conjunto, V_c , altura do leito, H_{leito} , e área transversal da broca, A_b . O leito de cascalho é composto por esferas de vidro e o fluido utilizado é a água. Nas subseções a seguir cada parâmetro é avaliado conforme exposto na Figura 4.3 no qual cada condição indica a combinação de parâmetros utilizada.

Condição		V_c	H_{leito}	A_b
	A	0,10 m/s	0,050 m	B2
		0,20 m/s		
	B	0,10 m/s	0,033 m	B2
			0,050 m	
	C	0,10 m/s	0,050 m	B1
				B2

Figura 4.3 – Condições estudadas experimentalmente por Peliano (2018) e que serão utilizadas para comparação com os resultados do modelo proposto.

Na subseção 4.1.1 é analisada a condição A para os valores de $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ e $0,20 \text{ m/s}$, mantendo-se constante a altura do leito $H_{leito} = 0,05 \text{ m}$ e área aberta A_a referente a broca 2. Em seguida na subseção 4.1.2 é avaliada a condição B, a influência da altura do leito, para $H_{leito} = 0,033 \text{ m}$ e $0,05 \text{ m}$ sendo fixo os valores de $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ e A_a referente a broca 2. Na sequência é estudada a condição C, a influência da área aberta A_a , mantendo constante $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ e $H_{leito} = 0,05 \text{ m}$ e os resultados são comparados com os resultados para os dois tipos de brocas utilizadas por Peliano (2018).

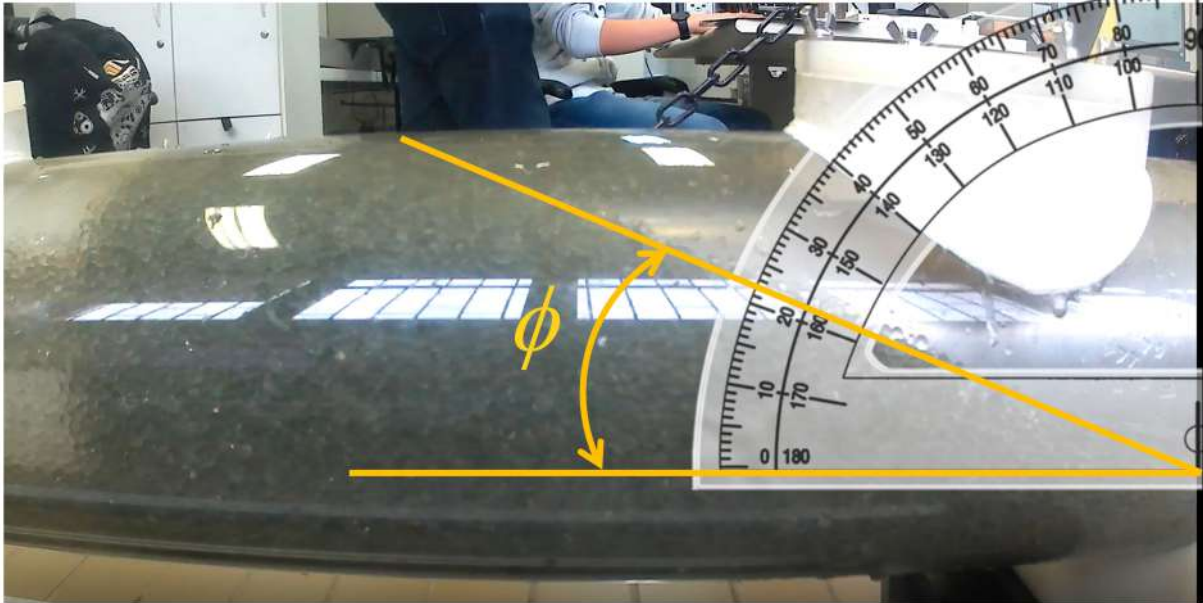
Todas as condições analisadas estão dentro dos limites do modelo proposto por Montillet et al. (2007) para o cálculo do gradiente de pressão no plugue, sendo Re_p entre 200 e 400 e $D/d_p \cong 22$. Os demais parâmetros do problema utilizados para o cálculo de F_T , na seção 4.1, são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados nos cálculos dos esforços sobre o conjunto baseados no experimento de Peliano (2018)

Parâmetros	Valores
ρ_p	2610 kg/m^3
d_p	3 mm
ϵ	0,35
ϕ	20°
ρ_f	1000 kg/m^3
η	0,001 $Pa.s$
W_{broca}	15 N
W_{coluna}	6,3 N/m
$R_{poço}$	0,075 m
R_{coluna}	0,038 m
L_{leito}	2,1 m
μ_{plugue} e μ_{leito}	0,3

O ângulo de repouso, ϕ , das partículas utilizadas por Peliano (2018) foi estimado através de imagens obtidas na mesma unidade experimental utilizada pelo autor e que está disponível no Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN). A Figura 4.4 demonstra como foi realizada a verificação do ângulo de repouso utilizado. A partir da imagem da pilha de cascalhos formada ao final do teste, apresentada na Figura 4.4, foi posicionado na altura do leito um transferidor sobre a imagem e traçada as linha representadas em amarelo estimando-se o ângulo de repouso da pilha de cascalhos.

Figura 4.4 – Verificação do ângulo de repouso da pilha de partículas formada durante experimento utilizando o aparato de Peliano (2018).



Fonte: Autoria própria.

A fração volumétrica de vazios, ε , os coeficientes de atrito, μ_{pluque} e μ_{leito} , foram baseados no estudo numérico de Kobayakawa et al. (2018), já discutido no capítulo 2. Os demais valores utilizados, como as propriedades da partícula (ρ_p e d_p), do fluido (ρ_f , η) e as dimensões do poço, da coluna e do leito ($R_{poço}$, R_{coluna} e L_{leito}) foram retirados do experimento realizado por Peliano (2018).

No final de casa subseção para avaliar a previsão dos resultados calculados pelo modelo com os resultados experimentais de Peliano (2018) será utilizado o método de análise de regressão linear baseado no estudo de Piñeiro et al. (2008). O método consiste em dispor os dados experimentais em função dos dados previstos pelo modelo e verificar se a reta ajustada, Equação 4.1, se aproxima da reta ideal ($y = x$), na qual $a = 1$ e $b = 0$.

$$y = ax + b \quad (4.1)$$

Ainda, deve se atentar para a representatividade do ajuste da reta observando-se o coeficiente de determinação r^2 . Por fim, deve se levar em conta a dispersão dos dados ajustado através do desvio padrão dos resíduos (RMSD) calculado pela Equação 4.2:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{nd - 1} \sum_{i=1}^{nd} (F_{T_{exp}i} - F_{T_{mod}i})^2} \quad (4.2)$$

em que nd é o número de dados, $F_{T_{exp}i}$ e $F_{T_{mod}i}$ são as forças experimentais e calculadas, respectivamente.

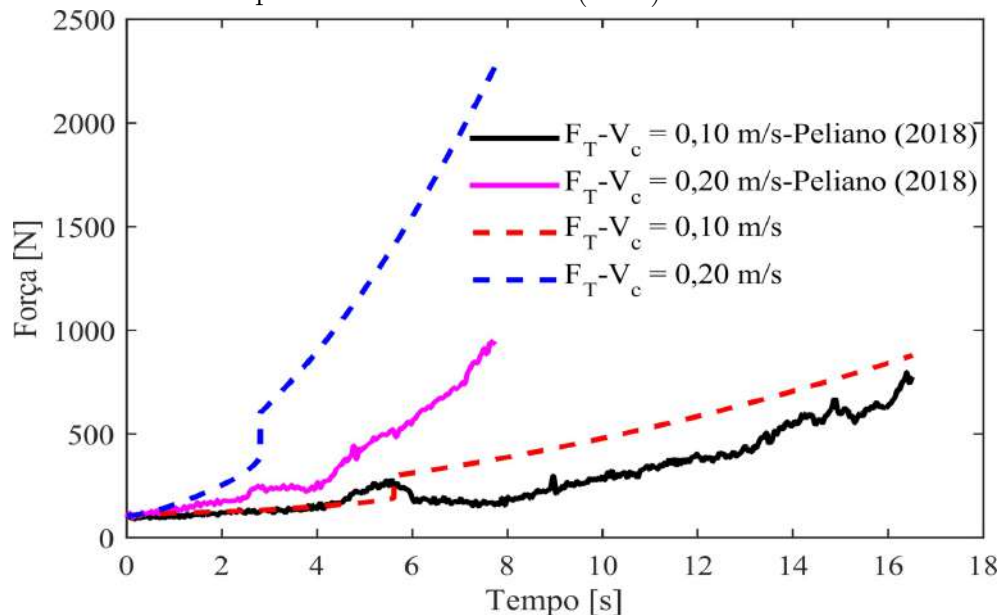
Em síntese, o ajuste é considerado satisfatório quando os valores de a e do coeficiente de determinação se aproximam de 1 e os valores de b e $RMSD$ são relativamente

pequenos.

4.1.1 AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE DO CONJUNTO - V_c

Os resultados da força de tração para o deslocamento do conjunto coluna-broca (F_T) calculados são comparados com os resultados experimentais de Peliano (2018) para a condição A da Figura 4.3 considerando *Saída 1* e $Z_{máxPilha}$. Na Figura 4.5 é apresentado o gráfico da F_T em função do tempo no qual as linhas tracejadas em azul e vermelho são os resultados calculados para $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ e $0,20 \text{ m/s}$, respectivamente. As linhas contínuas em rosa e preto são as forças obtidas experimentalmente para $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ e $0,20 \text{ m/s}$, respectivamente.

Figura 4.5 – Resultado calculado da força de tração F_T em função do tempo para condição A considerando *Saída 1* e $Z_{máxPilha}$ da Figura 4.3 comparado com os resultados experimentais de Peliano (2018).



Fonte: Autoria própria.

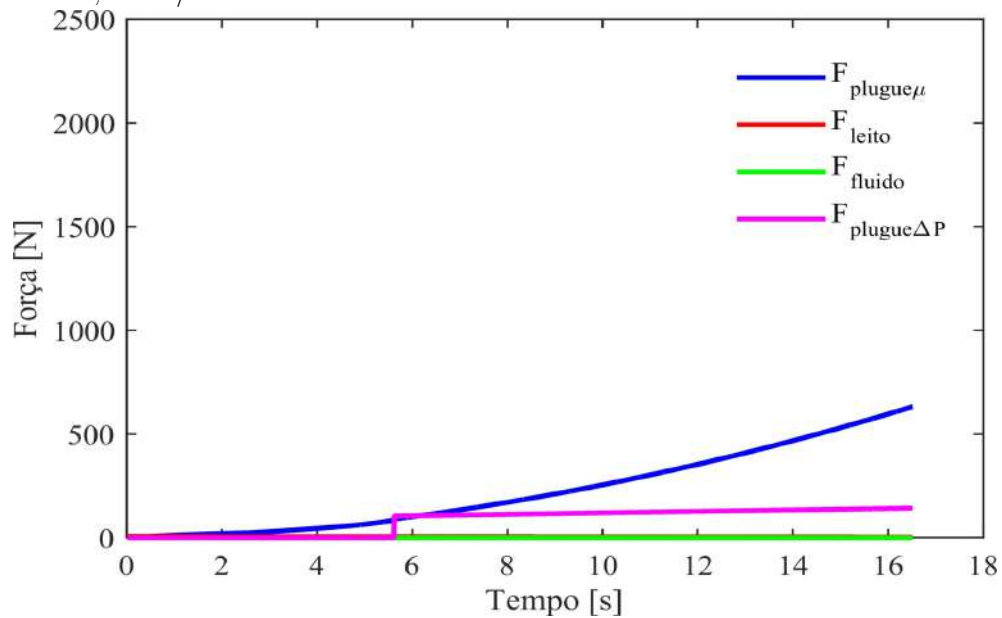
Para as duas velocidades analisadas foi observada a formação de plugue e o aprisionamento do conjunto. Observa-se pelo resultado experimental que maiores valores de F_T foram obtidos com o aumento de V_c . O mesmo comportamento pode ser verificado para os resultados de F_T calculados. Nota-se que as curvas calculadas pelo modelo acompanham a tendência similar à observada experimentalmente e também exibem maiores valores de F_T para $V_c = 0,20 \text{ m/s}$.

Os valores de F_T calculados para $V_c = 0,10 \text{ m/s}$, em linha vermelha tracejada, possui inicialmente boa concordância com o resultado experimental, em linha preta. Porém a partir do instante $t = 5,61 \text{ s}$ os valores de F_T calculados são ligeiramente maiores que o resultado obtido experimentalmente. O pico observado no resultado experimental para $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ segundo Peliano (2018) é gerado devido a passagem da broca por

tampas presentes no aparato experimental necessárias para a construção do leito, mas que não representam o problema estudado. Para $V_c = 0,20 \text{ m/s}$ observa-se que a curva de F_T calculada apresenta comportamento semelhante à curva experimental, no entanto os valores da força são maiores que os obtidos experimentalmente. A discrepância entre os valores de F_T calculados e experimentais será discutida posteriormente.

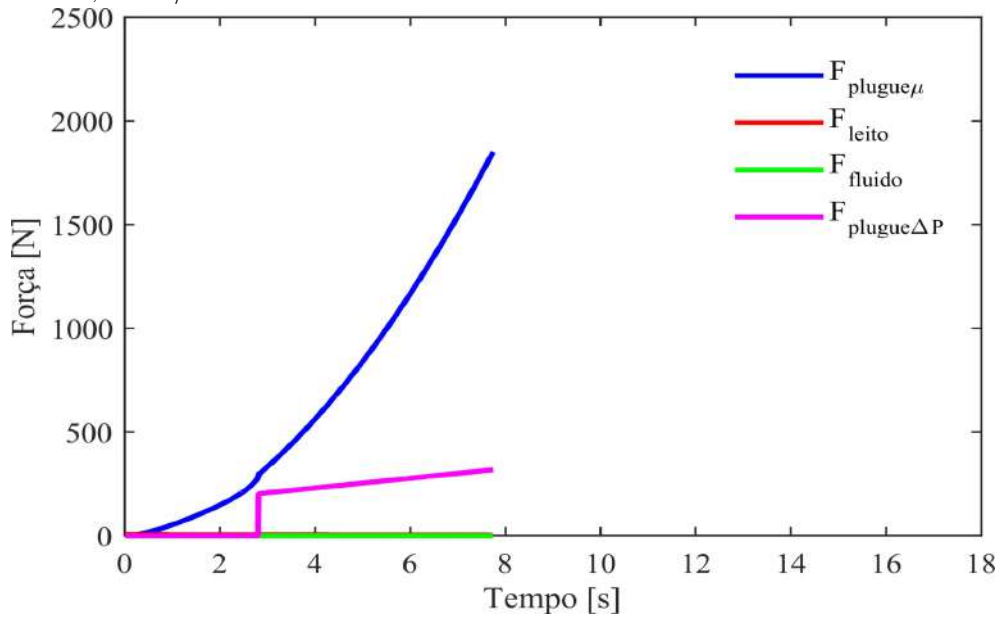
Nas Figuras 4.6 e 4.7 são apresentadas as curvas de cada força que compõe F_T , calculadas para $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ e $0,20 \text{ m/s}$ respectivamente. Para ambas V_c verifica-se que as forças que possuem maior contribuição para F_T são a força devido ao atrito entre a pilha/plugue e a parede do poço $F_{\text{plugue}\mu}$ e a força devido ao gradiente de pressão $F_{\text{plugue}\Delta P}$.

Figura 4.6 – Curvas das forças $F_{\text{plugue}\mu}$, F_{leito} , F_{fluido} e $F_{\text{plugue}\Delta P}$ em função do tempo, t , para condição A considerando *Saída 1* e $Z_{\text{máxPilha}}$ da Figura 4.3 e $V_c = 0,10 \text{ m/s}$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.7 – Curvas das forças $F_{plugue\mu}$, F_{leito} , F_{fluido} e $F_{plugue\Delta P}$ em função do tempo, t , para condição A considerando Saída 1 e $Z_{máxPilha}$ da Figura 4.3 e $V_c = 0,20 \text{ m/s}$.



Fonte: Autoria própria.

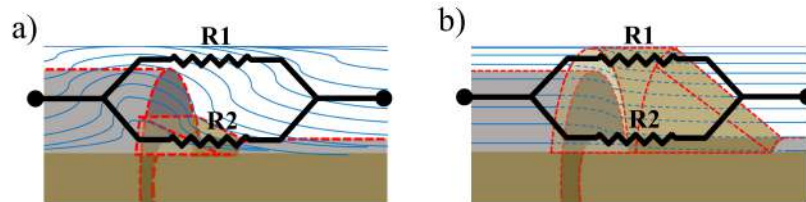
Como pode ser observado nas Figuras 4.6 e 4.7, $F_{plugue\mu}$, em linha azul apresenta comportamento similar à uma parábola e cresce com o aumento do acúmulo de cascalho já que a força normal é dependente da área de contato entre a pilha/plugue e a parede do poço. A segunda maior contribuição é da $F_{plugue\Delta P}$, em linha rosa, que surge apenas quando o anular é totalmente obstruído pelos cascalhos. Tanto $F_{plugue\mu}$ quanto $F_{plugue\Delta P}$ dependem do acúmulo de cascalho que forma a pilha e posteriormente o plugue.

Posto isso, os altos valores de F_T calculados estão associados à consideração do comprimento máximo da pilha ao se calcular o comprimento do plugue, L_{plugue} , como mostrado na Equação 3.47. Consequentemente, o gradiente de pressão no plugue também é afetado, já que depende do comprimento do plugue para ser calculado. Portanto, a consideração do comprimento máximo da pilha pode não representar o que é observado experimentalmente, uma vez que a diferença entre os valores F_T calculado e experimental é maior conforme o aumento de V_c .

Além disso, é possível observar que as curvas da F_T calculada, identificada pelas linhas pontilhada azul e vermelha na Figura 4.5, apresentam um salto nos instantes $t = 5,6 \text{ s}$ para $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ e $t = 2,8 \text{ s}$ para $V_c = 0,20 \text{ m/s}$. Esse comportamento se deve ao fato do modelo considerar que a força devido ao gradiente de pressão no plugue $F_{plugue\Delta P}$ surge apenas quando o anular está totalmente obstruído e se inicia o crescimento do plugue, como exibido na Figura 4.6(a) e (b) em linha rosa. O modelo considera que o fluido tende a escoar pela região de menor resistência como ilustrado na Figura 4.8(a), sendo $R1 \ll R2$. Desse modo, o fluido irá escoar apenas na região aberta, não escoando

entre os cascalhos que formam a pilha. Devido a essa consideração o fluido irá escoar entre os cascalhos apenas no momento que o anular for totalmente obstruído.

Figura 4.8 – Esquema da resistência ao escoamento do fluido (a) durante o crescimento da pilha de cascalhos e (b) após a obstrução do anular e crescimento do plugue.



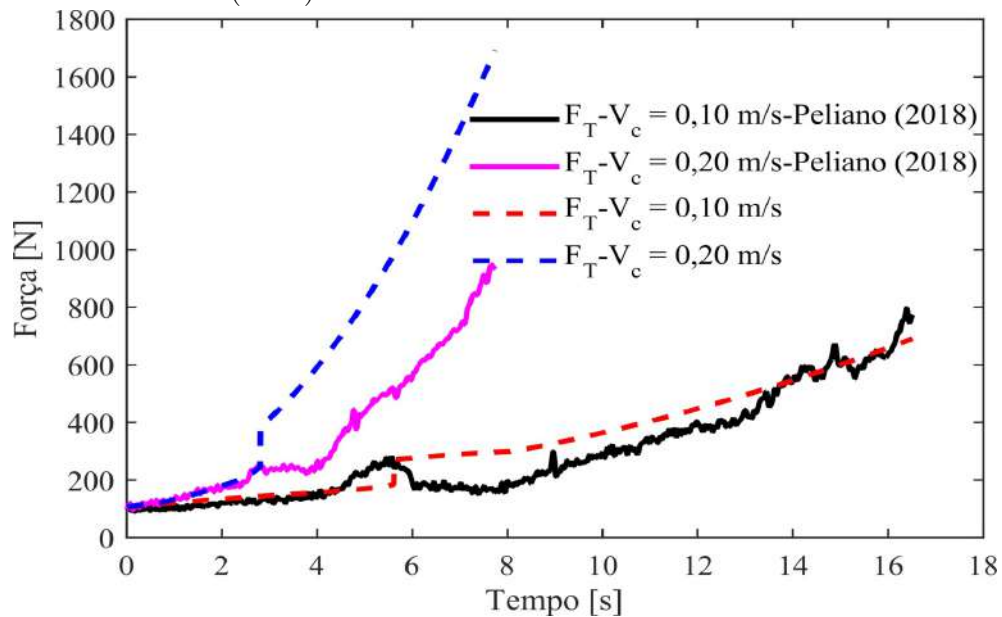
Fonte: Autoria própria.

Porém, conforme a pilha cresce a resistência à passagem do fluido pela região aberta aumenta e parte do fluido tende escoar também por entre a pilha de cascalhos. Como o modelo proposto não contabiliza essa porcentagem do fluido que pode escoar por entre a pilha durante seu crescimento, é observado o salto em F_T devido a formação do plugue.

Quando o anular é totalmente obstruído, como ilustrado na Figura 4.8(b), o fluido tende a escoar pela região de menor resistência. Sendo assim ao considerar $Z_{máxPilha}$ o gradiente de pressão no plugue calculado a partir de L_{plugue} será maior do que realmente é verificado experimentalmente.

Considerando $1/2 Z_{máxPilha}$ obtém-se o resultado apresentado na Figura 4.9, em que a F_T calculada para $V_c = 0, 10 \text{ m/s}$ e $0, 20 \text{ m/s}$ é representada pelas linhas tracejadas azul e vermelha respectivamente.

Figura 4.9 – Resultado calculado da F_T em função do tempo, para condição A da Figura 4.3 considerando $1/2 Z_{máxPilha}$ comparado com os resultados experimentais de Peliano (2018).



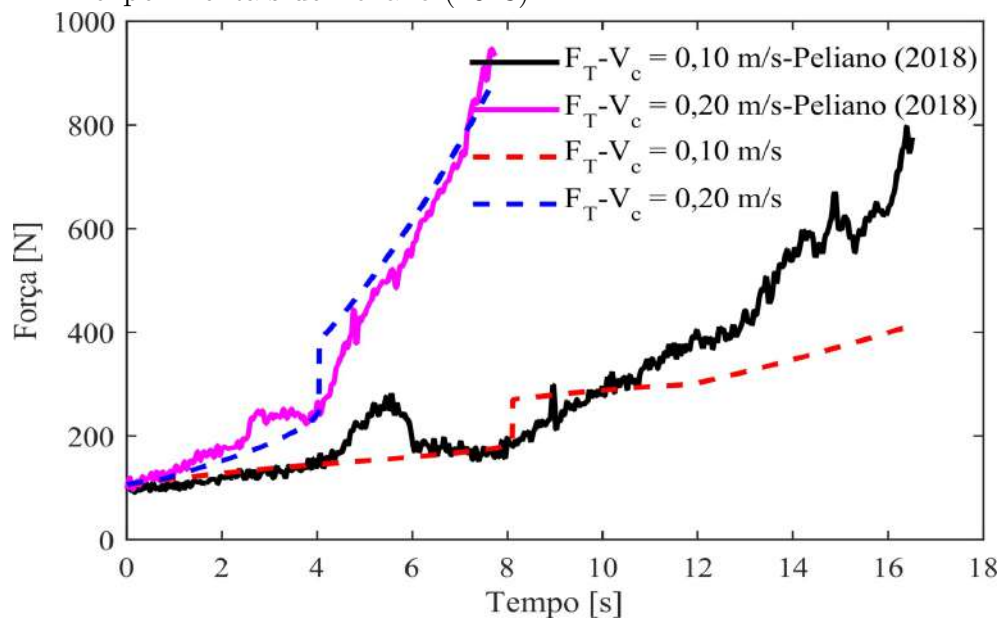
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que para $V_c = 0,10$ m/s a curva de F_T apresenta melhor concordância com os resultados experimentais. Para $V_c = 0,20$ m/s, inicialmente a curva de F_T calculada se assemelha à experimental, porém a partir de $t = 2,8$ s, a curva de F_T calculada apresenta valores maiores do que os observados no resultado experimental. Contudo, a inclinação da curva segue a mesma tendência. Acredita-se que esse aumento da força esteja relacionado à consideração da Saída 1 para o volume de cascalhos que sai do volume de controle. Para $V_c = 0,10$ m/s a consideração da Saída 1 aparenta ser equivalente a do experimental, devido a concordância entre os resultados de F_T apresentados na Figura 4.9. Porém com o aumento de V_c , a velocidade do fluido também aumenta resultando no carreamento de cascalhos.

Na Figura 4.10 são apresentados os resultados de F_T em função do tempo considerando que o volume de cascalhos que sai do volume de controle é igual a Saída 2, para $V_c = 0,10$ m/s e $0,20$ m/s. O resultado de F_T calculada para $V_c = 0,20$ m/s considerando o carreamento de cascalhos pelo fluido apresentou boa concordância com o resultado experimental. É interessante notar que o modelo consegue identificar a mudança de inclinação da curva experimental próximo do instante $t = 4$ s, no qual a força aumenta rapidamente.

Comportamento semelhante pode ser notado para o resultado experimental de $V_c = 0,10$ m/s na Figura 4.10, em que no instante $t = 8$ s ocorre o rápido crescimento de F_T . Os valores de F_T calculados divergem do experimental a partir de $t = 8$ s, quando ocorre a formação do plugue. Sendo assim, para $V_c = 0,10$ m/s acredita-se que o carreamento de cascalhos pelo fluido deve ocorrer somente durante o crescimento da pilha como

Figura 4.10 – Resultado calculado da F_T em função do tempo, para condição A da Figura 4.3 considerando $1/2 Z_{máxPilha}$ e Saída 2 comparado com os resultados experimentais de Peliano (2018).

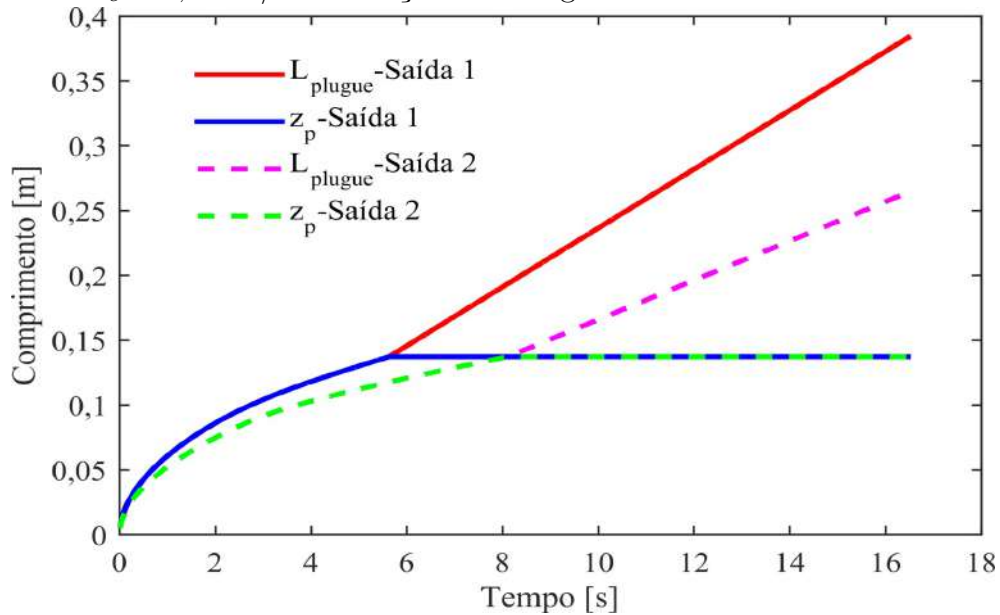


Fonte: Autoria própria.

ilustra a Figura 3.6(a). Acredita-se que para $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ a velocidade do fluido não é suficiente para carrear os cascalhos quando o anular é totalmente obstruído. Conforme identificado anteriormente na Figura 4.6, as principais forças que compõe F_T são as forças devido ao acúmulo de cascalhos que formam a pilha e posteriormente o plugue, desta forma o desenvolvimento dessas variáveis será discutido a seguir.

Na Figura 4.11 o crescimento da pilha e o desenvolvimento do plugue para $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ são comparados para as duas considerações de volume de cascalhos que sai do volume de controle Saída 1 e Saída 2. Na imagem, a linha azul representa o caso com Saída 1 e a linha verde tracejada o comprimento da pilha para o caso com a Saída 2. Em ambos os casos, o comprimento da pilha cresce até o momento em que o espaço anular é obstruído e se inicia o crescimento do plugue, representado pelas linhas vermelha e rosa tracejada para Saída 1 e Saída 2, respectivamente.

Figura 4.11 – Comparação entre a Saída 1 e 2 no desenvolvimento de L_{plugue} e z_p , para $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ e condição A da Figura 4.3.

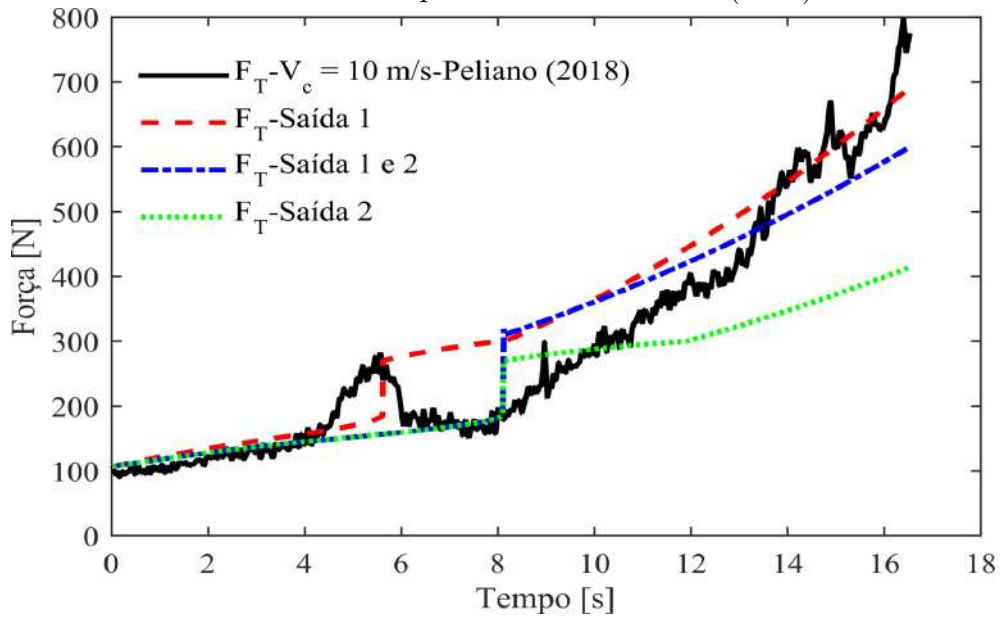


Fonte: Autoria própria.

Quando o carregamento de cascalhos pelo fluido é considerado (*Saída 2*) para $V_c = 0,10 \text{ m/s}$, percebe-se que o crescimento da pilha é mais lento, de acordo com a curva em linha verde pontilhada na Figura 4.11 e L_{plugue} é menor que para o caso de *Saída 1*. Por esse motivo F_T continua sendo menor do que o observado experimentalmente mesmo depois da formação do plugue, conforme apresentado na Figura 4.10. No caso de $V_c = 0,10 \text{ m/s}$ acredita-se que ocorram ambas as condições de saída, *Saída 1* e *Saída 2*. Durante o crescimento da pilha é considerada a *Saída 2*. Após a obstrução do anular, como o fluido não consegue carrear os cascalhos devido à menor velocidade de deslocamento do conjunto, a quantidade de cascalho que sai do volume de controle é a condição de *Saída 1*.

O resultado de F_T com base na hipótese acima é apresentado na Figura 4.12 no qual em linha vermelha tracejada é o resultado de F_T considerando apenas a *Saída 1*, em linha azul traço ponto são consideradas ambas as saídas (*Saída 1 e 2*) e em linha verde pontilhada somente a *Saída 2*. A partir do resultado apresentado na Figura 4.12, nota-se que o resultado para *Saída 1 e 2* consegue identificar a mudança de inclinação da curva próximo do instante $t = 8 \text{ s}$ e a magnitude das forças também está mais próxima do observado experimentalmente.

Figura 4.12 – Resultados calculados de F_T , para $V_c = 0, 10 \text{ m/s}$ e Saída 1, Saída 1 e 2, Saída 2 com condição A da Figura 4.3 considerando $1/2 Z_{máxPilha}$ comparado com o resultado experimental de Peliano (2018).



Fonte: Autoria própria.

A seguir é avaliada a previsão dos resultados calculados em comparação com os resultados experimentais utilizando o método de análise de regressão linear que foi apresentado no início da Seção 4.1. A Tabela 4.2 apresenta os coeficientes da análise de regressão linear para $V_c = 0, 10 \text{ m/s}$.

Tabela 4.2 – Valores dos coeficientes da reta ajustada (a e b), do coeficiente de determinação (r^2) e do desvio padrão dos resíduos ($RMSD$) para os casos de $V_c = 0, 10 \text{ m/s}$.

Caso	a	b	r^2	$RMSD$
Saída 1 – $Z_{máxPilha}$	0,69	7,61	0,88	152,01
Saída 1 – $1/2 Z_{máxPilha}$	0,98	-35,20	0,91	66,06
Saída 2 – $1/2 Z_{máxPilha}$	1,71	-109,49	0,85	111,87
Saída 1 e 2 – $1/2 Z_{máxPilha}$	1,04	-13,33	0,89	59,22

Com base nos valores de r^2 mostrados na tabela (próximos de 0,90), verifica-se que em todos os casos os ajustes realizados apresentaram boa correlação entre os dados, indicando que há uma dependência linear entre os resultados calculados e os resultados experimentais. As oscilações de grande amplitude nos dados experimentais podem ser fatores pelos quais as correlações não apresentaram valores mais próximos de 1.

As melhores correlações são para os casos Saída 1 – $1/2 Z_{máxPilha}$ e Saída 1 e 2 – $1/2 Z_{máxPilha}$, com valores de a , b , r^2 e $RMSD$ equivalentes. Dentre estes dois casos, Saída 1 – $1/2 Z_{máxPilha}$ apresentou os melhores coeficiente angular (0,98) e coeficiente de correlação (0,91). Por sua vez, Saída 1 e 2 – $1/2 Z_{máxPilha}$ obteve menor coeficiente linear

($-13,33 N$) e menor desvio padrão dos resíduos, com $RMSD = 59,22 N$. Ainda assim, por apresentar o maior r^2 e se tratar de uma modelagem um pouco menos complexa, o caso *Saída 1* – $1/2Z_{máxPilha}$ será utilizado nas próximas subseções para avaliar a variação da altura do leito (H_{leito}) e área aberta (A_a).

Os resultados da análise de regressão linear para $V_c = 0,20 m/s$ é apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores dos coeficientes da reta ajustada (a e b), do coeficiente de determinação (r^2) e do desvio padrão dos resíduos ($RMSD$) para os casos de $V_c = 0,20 m/s$.

Caso	a	$b[N]$	r^2	$RMSD[N]$
<i>Saída 1</i> – $Z_{máxPilha}$	0,34	47,87	0,95	714,07
<i>Saída 1</i> – $1/2Z_{máxPilha}$	0,48	52,23	0,97	384,03
<i>Saída 2</i> – $1/2Z_{máxPilha}$	0,93	18,67	0,97	45,58

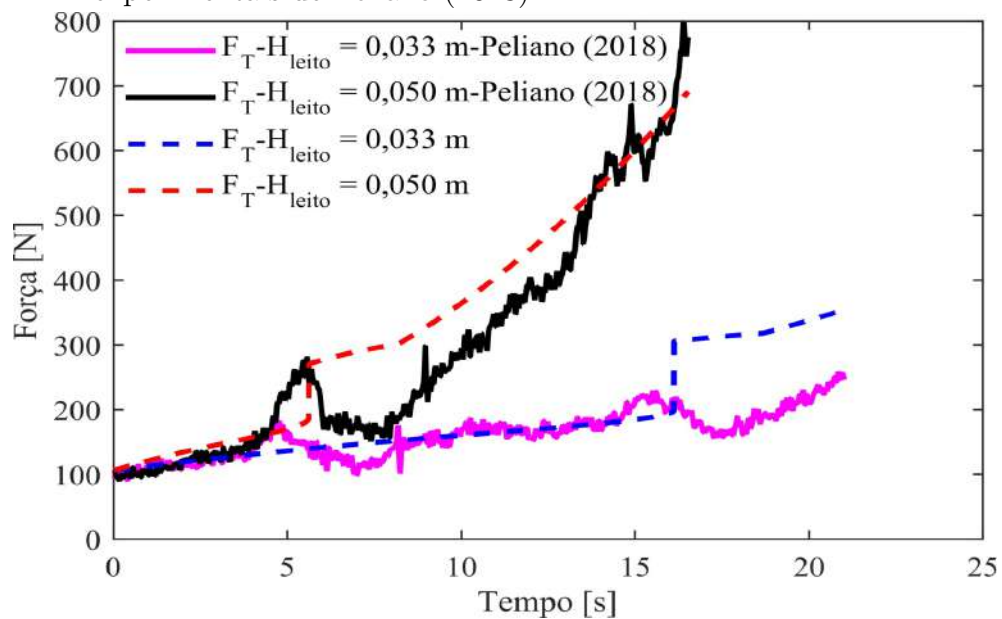
Similar ao observado para $V_c = 0,10 m/s$, os ajustes das curvas para $V_c = 0,20 m/s$ apresentaram bons coeficientes de correlação, maiores que 0,95, também indicando dependência linear entre os resultados. Porém para esta velocidade, apenas o caso *Saída 2* – $1/2Z_{máxPilha}$ é capaz de representar boa concordância entre os resultados calculados e experimentais, apresentando coeficiente angular de 0,93, coeficiente linear 18,67 N , coeficiente de correlação de 0,97 e desvio padrão dos resíduos de 45,58 N . Nos demais casos, os valores calculados foram muito superestimados, fazendo também com que o desvio padrão dos resíduos alcançasse valores elevados.

Os resultados apresentados nesta subseção demonstram que o modelo é capaz de reproduzir o aumento da força devido ao aumento de V_c de forma similar ao obtido experimentalmente. Além disso, foi possível identificar que as forças devido à formação do plugue são as que possuem maior contribuição na F_T durante o deslocamento do conjunto. Ainda, foram discutidos diferentes aspectos do modelo que podem ser aprimorados para melhor descrever os fenômenos observados experimentalmente como consideração de saída e carreamento dos cascalhos.

4.1.2 ALTURA DO LEITO - H_{leito}

Nesta subseção serão comparados os resultados calculados de F_T com os resultados experimentais de Peliano (2018) para as alturas de leito de 0,033 m e 0,05 m . Na Figura 4.13 são apresentadas as F_T calculadas em função do tempo para $H_{leito} = 0,033 m$ e $H_{leito} = 0,050 m$. Em linha rosa e preta são os resultados experimentais para $H_{leito} = 0,033 m$ e 0,050 m , respectivamente. Verifica-se que para $H_{leito} = 0,050 m$ a F_T calculada e experimental exibem comportamento semelhante ao exponencial enquanto que para a altura de leito menor, $H_{leito} = 0,033 m$, o crescimento de F_T é mais próximo do linear.

Figura 4.13 – Resultado calculado da F_T em função do tempo, para condição B da Figura 4.3 considerando $1/2 Z_{máxPilha}$ e Saída 1 comparado com os resultados experimentais de Peliano (2018).

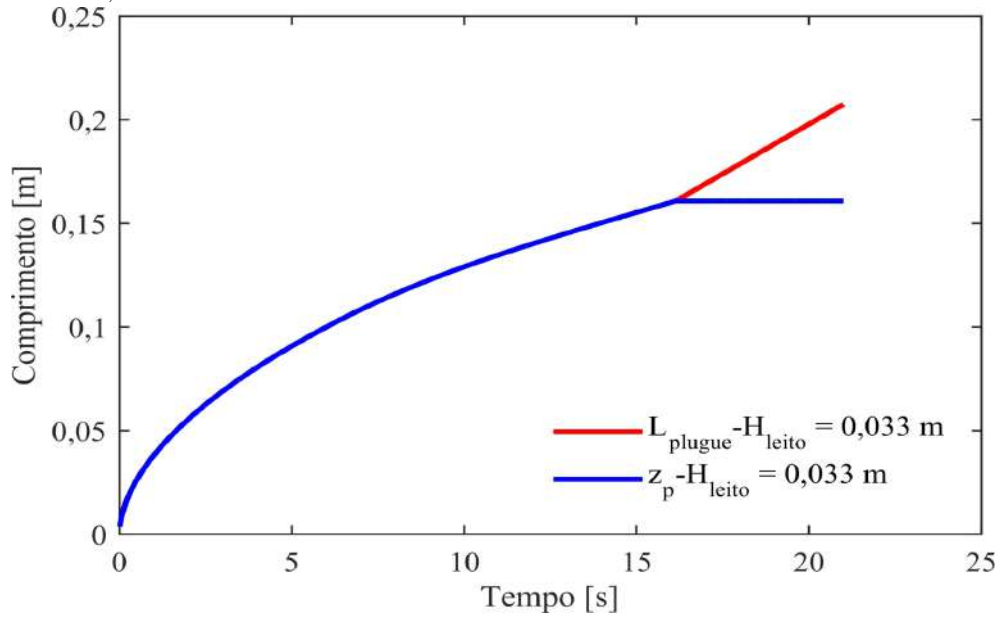


Fonte: Autoria própria.

Nota-se que como no resultado experimental, a força F_T calculada segue tendência semelhante. Quanto maior a altura do leito, menor é área aberta para um mesmo tipo de broca, e como observado por Rasi et al. (1994) a maior altura de leito $0,050 \text{ m}$ apresenta forças maiores. Porém para $H_{leito} = 0,033 \text{ m}$ após o instante $t = 15 \text{ s}$ a força calculada apresenta valores acima dos observados experimentalmente. De acordo com Peliano (2018), as reduções na força medida em $t = 5 \text{ s}$ e $t = 15 \text{ s}$ ocorriam durante a passagem da broca pela tampa. O acumulado de cascalhos que acompanha o deslocamento do conjunto e está em contato com a parte superior da tubulação era carregado devido ao alto atrito com a tampa resultando na queda da força logo após a passagem. Segundo Peliano (2018), para $H_{leito} = 0,033 \text{ m}$ foi observada a formação de plugue no teste, no entanto não houve o aprisionamento do conjunto.

Através da análise do crescimento da pilha de cascalhos e desenvolvimento do plugue na Figura 4.14, observa-se que o espaço anular está totalmente obstruído no instante $t = 16,1 \text{ s}$ e há a formação de plugue. O comprimento do plugue observado por Peliano (2018) ao final do experimento com $H_{leito} = 0,033 \text{ m}$ foi de aproximadamente $L_{plugue} = 0,21 \text{ m}$, valor mais próximo do calculado considerando a Saída 1, como exibido na Figura 4.14 em que $L_{plugue} = 0,2075 \text{ m}$.

Figura 4.14 – Desenvolvimento de L_{plugue} e z_p , para Saída 1, $V_c = 0,10 \text{ m/s}$, $H_{leito} = 0,033 \text{ m}$ e Broca 2.



A seguir, utilizando o método de análise de regressão linear que foi apresentado no início da Seção 4.1, é avaliado o resultado calculado em comparação com o resultado experimental para $H_{leito} = 0,033 \text{ m}$. A análise de regressão linear para o caso com $H_{leito} = 0,033 \text{ m}$ é melhor representada separando os dados para Saída 1 em duas partes. A primeira parte representa os valores da F_T calculados antes do instante $t = 16,1 \text{ s}$ e a segunda parte as forças calculadas após a formação do plugue. Os valores dos coeficientes a , b , r^2 e do $RMSD$ são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores dos coeficientes da reta ajustada (a e b), do coeficiente de determinação (r^2) e do desvio padrão dos resíduos ($RMSD$) para os casos com $H_{leito} = 0,033 \text{ m}$ dividido em duas partes.

Caso	a	b	r^2	$RMSD$
$H_{leito} = 0,033 \text{ m} - \text{Parte 1}$	1,58	-22,0752	0,75	16,05
$H_{leito} = 0,033 \text{ m} - \text{Parte 2}$	1,14	-313,79	0,79	127,11

O caso com $H_{leito} = 0,033 \text{ m} - \text{Parte 2}$, apesar de superestimar os valores da F_T apresenta coeficiente de correlação razoável, $r^2 = 0,79$. O coeficiente angular ajustado, $a = 1,14$, indica que o modelo prevê uma tendência similar aos resultados experimentais, superestimando porém seus valores, uma vez que $b = -313,79 \text{ N}$. A discrepância entre os resultados é também evidenciada pelo desvio médio dos resíduos, calculado como $127,11 \text{ N}$, valor elevado em comparação à escala das forças.

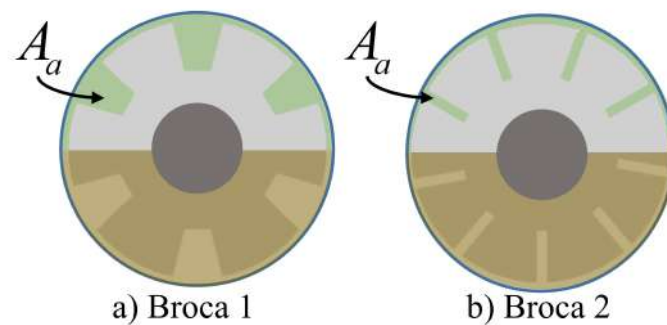
De forma geral, em comparação com os resultados apresentados para a velocidade, os quais apresentaram r^2 próximos a 0,90, verifica-se que o modelo foi menos eficaz no

cálculo da força para a altura de leito menor. Isso se deve também ao fato dos dados experimentais apresentarem forças de menor magnitude, fazendo com que as oscilações das medições prejudiquem a precisão do ajuste. Ainda assim, o modelo foi capaz de reproduzir os padrões de evolução da força para as diferentes alturas de leito.

4.1.3 ÁREA TRANSVERSAL DA BROCA - A_b

Nesta subseção, F_T calculada é comparada ao resultado experimental obtido por Peliano (2018) para os dois tipos de broca avaliados no experimento. As brocas utilizadas estão ilustradas na Figura 4.15 e a área aberta para cada broca está destacada em verde. No modelo, a área transversal das brocas é considerada como circular e uniforme. A *Broca 1* possui área transversal igual a 7804 mm^2 apresentando maior área aberta, A_a , diferente da *Broca 2* que possui maior área transversal de 13097 mm^2 e conseqüentemente menor A_a .

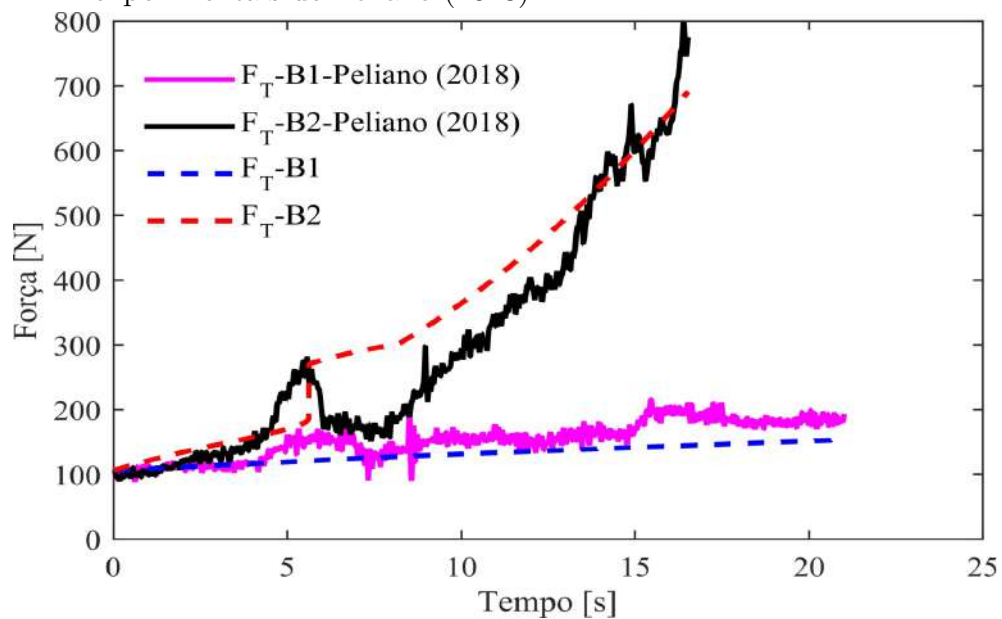
Figura 4.15 – Representação da área aberta, A_a , para (a) *Broca 1* e (b) *Broca 2* utilizadas no experimento de Peliano (2018).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.16, são apresentados os resultados de F_T em função do tempo para *Broca 1* e *Broca 2*. Os valores de F_T calculados são representado pelas linhas tracejadas, azul para a *Broca 1* e vermelha para *Broca 2* e são comparados aos resultados experimentais de Peliano (2018) em linha preta para *Broca 2* e rosa para *Broca 1*.

Figura 4.16 – Resultado calculado da F_T em função do tempo, para condição B da Figura 4.3 considerando $1/2 Z_{máxPilha}$ e Saída 1 comparado com os resultados experimentais de Peliano (2018).

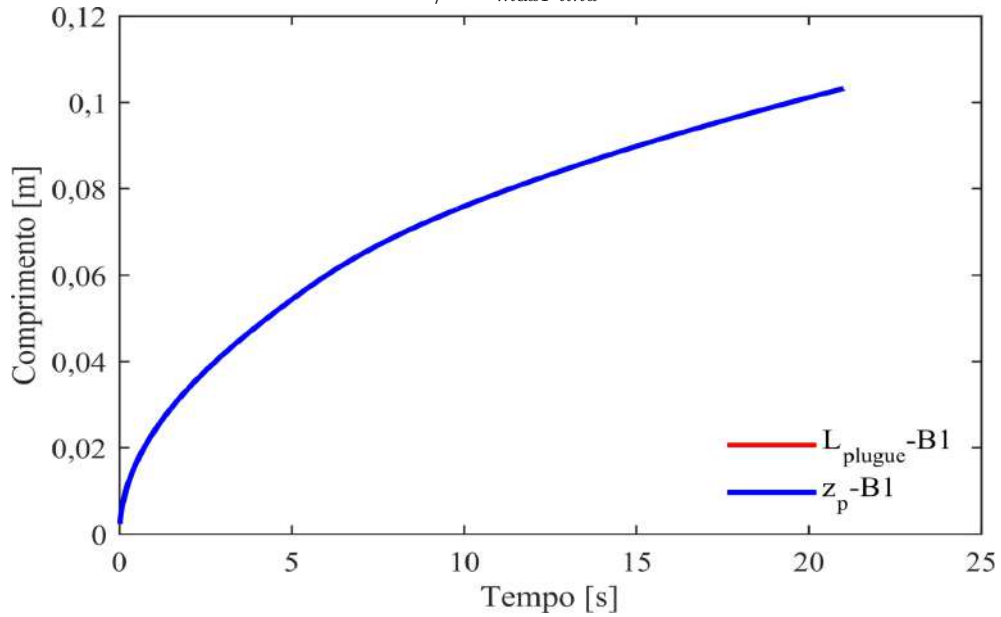


Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados exibidos na Figura 4.16, nota-se que as curvas de F_T calculadas apresentam boa correspondência com os resultados experimentais. Assim como observado por Rasi et al. (1994) e Peliano (2018) o modelo também obtém maiores forças para a menor seção de área aberta A_a . Quanto menor a área aberta maior é a área transversal ocupada pela broca dentro do poço. Logo, maior será a quantidade de cascalhos que entra no volume de controle e menor é a quantidade de cascalhos que sai, como descrito pelas Equações 3.2 e 3.9.

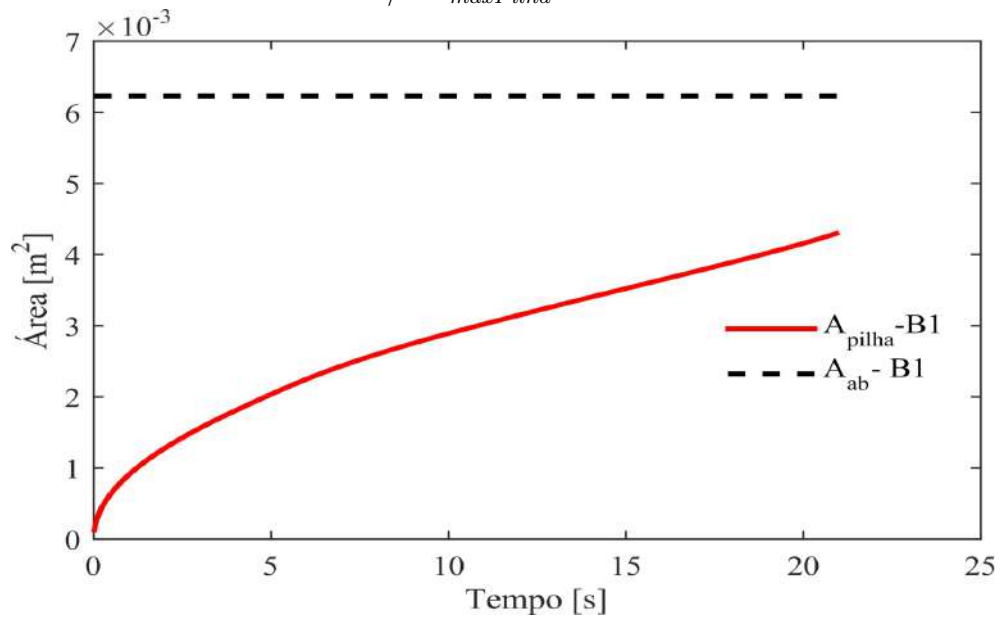
Assim como constatado experimentalmente, o modelo também verificou que não há a formação de plugue para a Broca 1, como pode ser observado na Figura 4.17 em linha azul contínua, nota-se apenas a curva que representa o crescimento da pilha. Portanto não houve a obstrução do espaço anular, como pode se verificar pelo crescimento da área transversal da pilha, A_{pilha} , apresentado no gráfico da Figura 4.18 em linha vermelha. A área transversal da pilha ao final do teste é menor do que a área aberta na região da broca, A_{ab} , representada em linha preta tracejada.

Figura 4.17 – Desenvolvimento de L_{plugue} e z_p , para *Broca 1* e condição C da Figura 4.3 considerando *Saída 1* e $1/2 Z_{máxPilha}$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.18 – Desenvolvimento da A_{pilha} , para *Broca 1* e condição C da Figura 4.3 considerando *Saída 1* e $1/2 Z_{máxPilha}$.



Fonte: Autoria própria.

Os valores de F_T calculados para a *Broca 1* em comparação com o valores obtidos experimentalmente são analisados pelo método da regressão linear e os resultados da análise apresentados na Tabela 4.5

Tabela 4.5 – Valores dos coeficientes da reta ajustada (a e b), do coeficiente de determinação (r^2) e do desvio padrão dos resíduos ($RMSD$) para os casos da *Broca 1*.

Caso	a	$b[N]$	r^2	$RMSD[N]$
<i>Saída 1</i> – $1/2Z_{máxPilha}$	1,90	–96,75	0,80	27,83

Os dados da Tabela 4.5 revelam que a correlação entre os dados experimentais e calculados não é tão boa como indicava a Figura 4.15. Apesar do coeficiente de correlação de 0,80 ser razoável e do desvio padrão dos resíduos ser relativamente baixo, as forças calculadas subestimam as observadas experimentalmente. Ainda assim, no experimento com a *Broca 1* as oscilações na força são grandes quando comparadas à força máxima, o que mais uma vez pode comprometer a avaliação do modelo através desse método.

4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Nesta seção é apresentada a análise de sensibilidade do modelo à variação do ângulo de repouso do cascalho e do coeficiente de atrito. A combinação de parâmetros utilizados estão definidos na Tabela 4.6.

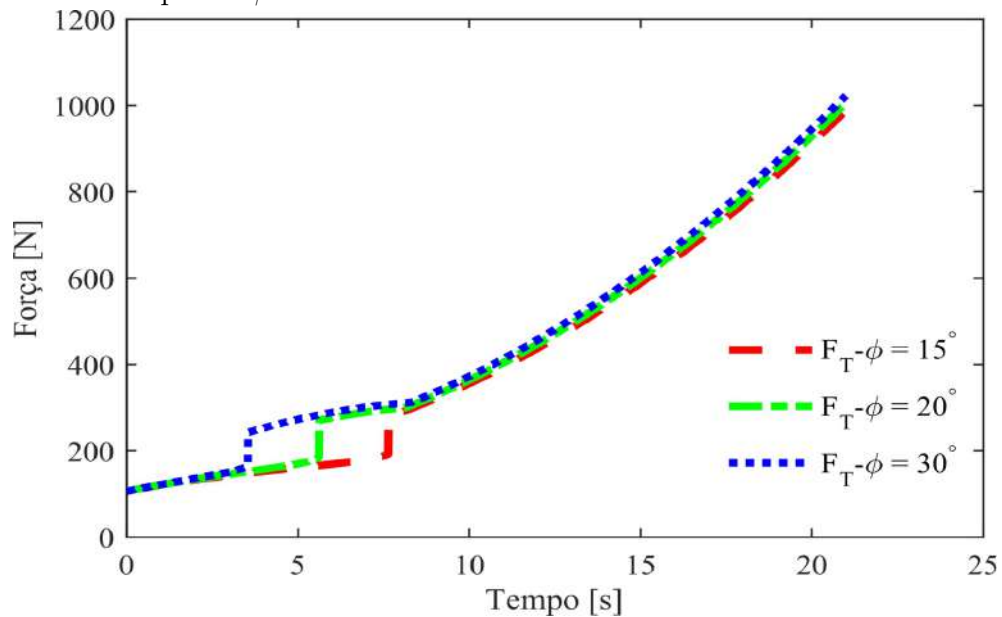
Tabela 4.6 – Parâmetros utilizados para análise de sensibilidade do modelo

Parâmetros	Valores
ρ_p	2610 kg/m^3
d_p	3 mm
ϵ	0,35
ρ_f	1000 kg/m^3
η	0,001 $Pa.s$
W_{broca}	15 N
W_{coluna}	6,3 N/m
$R_{poço}$	0,075 m
R_{coluna}	0,038 m
L_{leito}	2,1 m
H_{leito}	0,050 m
V_c	0,10 m/s
<i>Broca 2</i>	13,097 mm^2

4.2.1 EFEITO DO ÂNGULO DE REPOUSO - ϕ

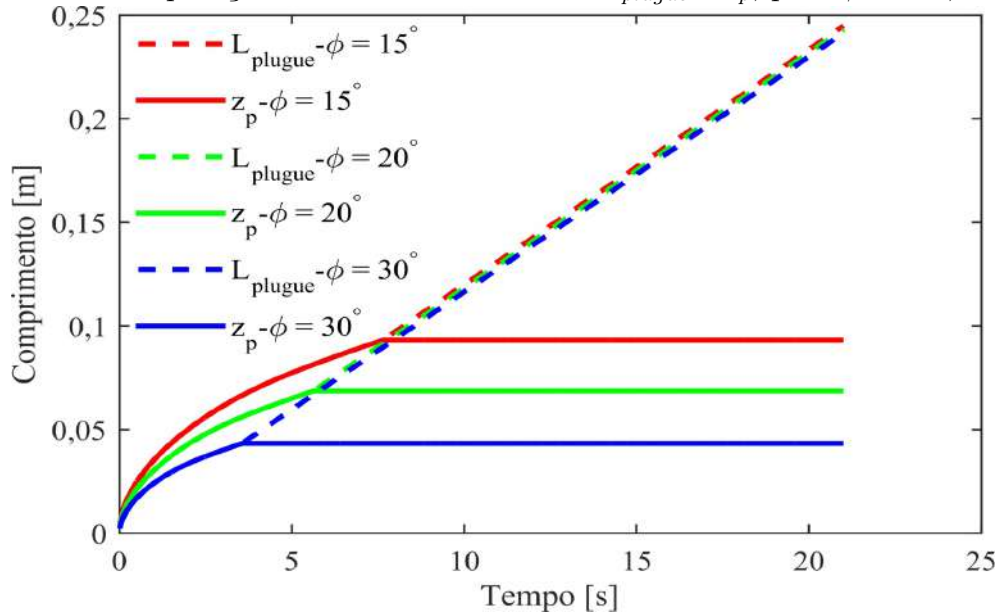
Na Figura 4.19 é apresentada F_T em função do tempo para três diferentes valores de ângulo de repouso: $\phi = 15^\circ$ em linha tracejada vermelha, $\phi = 20^\circ$ em linha traço ponto verde e $\phi = 30^\circ$ em linha pontilhada azul.

Figura 4.19 – Resultado da F_T calculada em função do tempo, variando o valor do ângulo de repouso ϕ .



Fonte: Autoria própria.

A partir das curvas da F_T apresentadas na Figura 4.19 observa-se que a variação de ϕ influencia muito pouco no valor da força calculada como pode ser verificado pelo valor final de F_T sendo 989 N, 1006 N e 1023 N para $\phi = 15^\circ$, 20° e 30° respectivamente. Porém, nota-se que conforme o ângulo de repouso aumenta o salto da curva de F_T demora menos tempo para ocorrer, sendo em $t = 3,53$ s para $\phi = 30^\circ$, $t = 5,61$ s para $\phi = 20^\circ$ e em $t = 7,63$ s para $\phi = 15^\circ$. Como já discutido na seção 4.1.1, esse salto está relacionado à formação do plugue. O desenvolvimento de L_{plugue} e z_p para os três valores de ϕ analisados é apresentado na Figura 4.20. As linhas contínuas representam o crescimento da pilha de cascalho e as linhas pontilhadas o comprimento do plugue e as cores azul, verde e vermelha equivale aos resultados para $\phi = 15^\circ$, 20° e 30° respectivamente.

Figura 4.20 – Comparação do desenvolvimento de L_{plugue} e z_p , para $\phi = 15^\circ, 20^\circ$ e 30° .

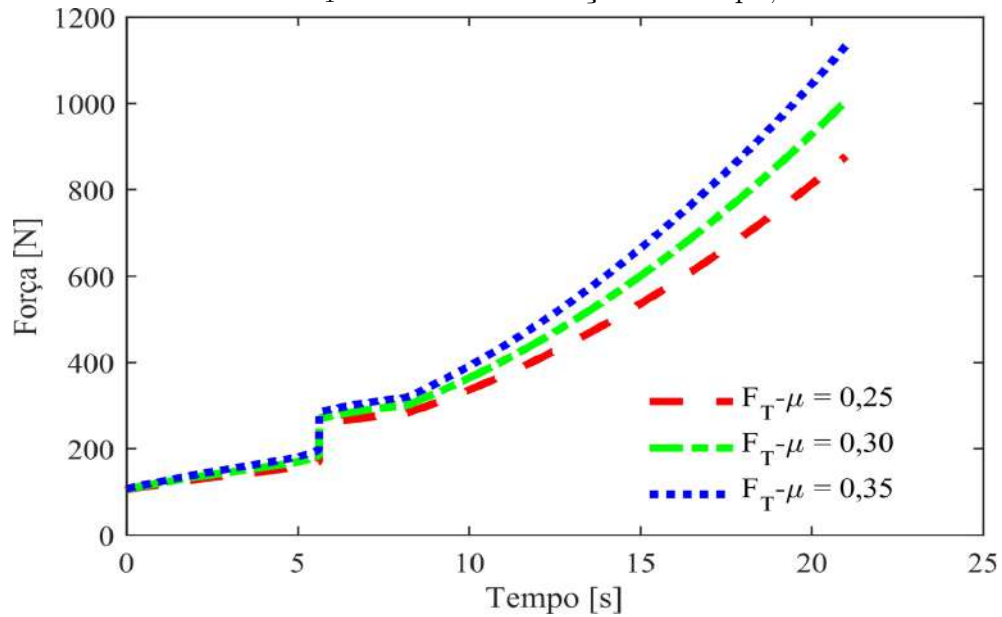
Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.20, a obstrução do anular e o crescimento do plugue ocorre mais cedo quanto maior o valor de ϕ . Apesar disso os comprimentos finais do plugue são muito próximos sendo $L_{plugue} = 0,4827\text{ m}$, $0,4863\text{ m}$ e $L_{plugue} = 0,4897\text{ m}$ para $\phi = 15^\circ, 20^\circ$ e 30° respectivamente.

A partir do resultados apresentados nessa seção contata-se que para o presente modelo quanto maior o ângulo de repouso da partícula mais cedo será observada a formação do plugue. Porém a variação de ϕ não possui grandes efeitos nos valores de F_T calculados.

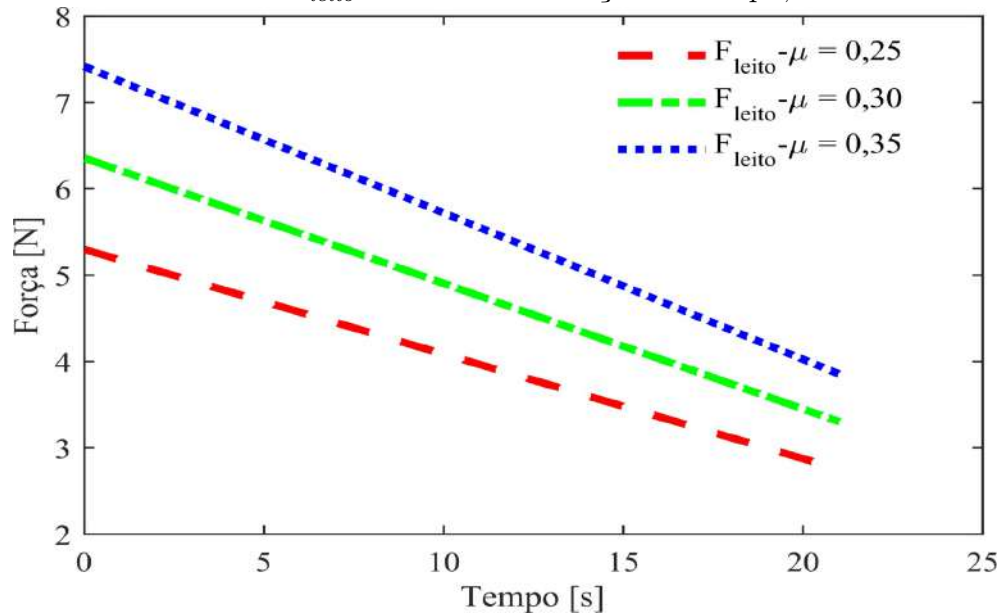
4.2.2 EFEITO DO COEFICIENTE DE ATRITO - μ

Na Figura 4.21 é apresentada a F_T em função do tempo para três valores de coeficiente de atrito: $\mu = 0,25$ em linha tracejada vermelha, $\mu = 0,30$ em linha traço ponto verde e $\mu = 0,35$ em linha pontilhada azul. O resultado apresentado na Figura 4.21 mostra que até o instante de $t = 5,61\text{ s}$ as curvas de F_T estão praticamente sobrepostas. Porém após o salto de F_T , que indica a formação do plugue, verifica-se que as curvas das forças começam a se distanciar. Quanto maior o valor de μ maior são as forças, como pode ser observado pelo valor final de F_T , sendo de 878 N para $\mu = 0,25$, 1006 N para $\mu = 0,30$ e 1134 N para $\mu = 0,35$.

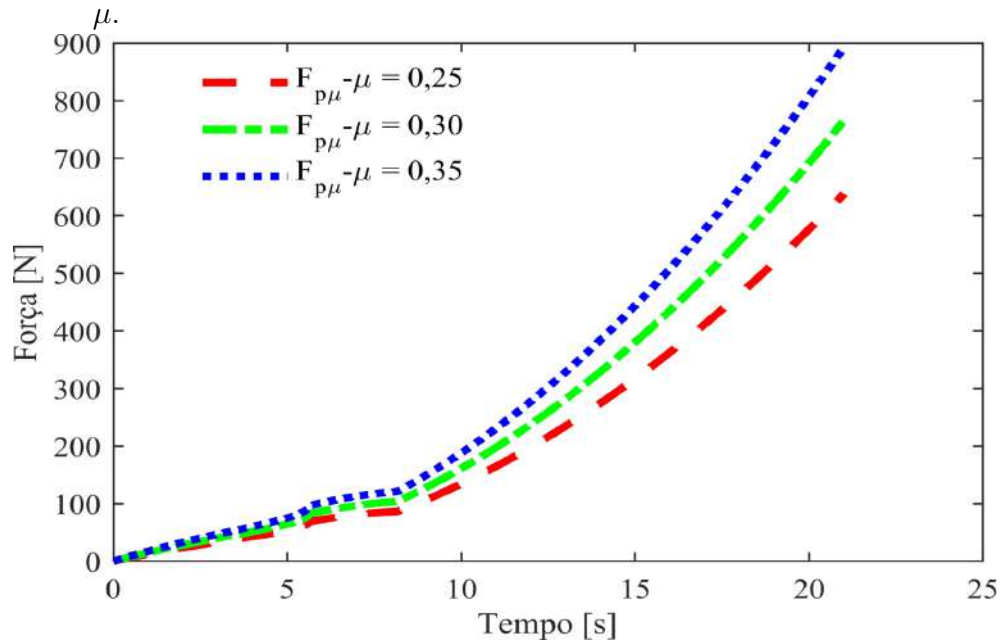
Figura 4.21 – Resultado da F_T calculada em função do tempo, variando o valor de μ .

Fonte: Autoria própria.

No modelo o coeficiente de atrito é utilizado para o cálculo das forças de atrito: F_{leito} que contabiliza o atrito entre o conjunto coluna-broca e o leito de cascalhos e $F_{plugue\mu}$ que representa o atrito entre o pilha/plugue e a parede do poço. Nos resultados apresentados na Figura 4.21 foi utilizado o mesmo valor de coeficiente de atrito para ambas as forças. Porém, como é possível observar pela Figura 4.22 e 4.23 a maior influência é devido a força de atrito entre o plugue e a parede do poço.

Figura 4.22 – Resultado da F_{leito} calculada em função do tempo, variando o valor de μ .

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.23 – Resultado da $F_{plugue\mu}$ calculada em função do tempo, variando o valor de μ .

Fonte: Autoria própria.

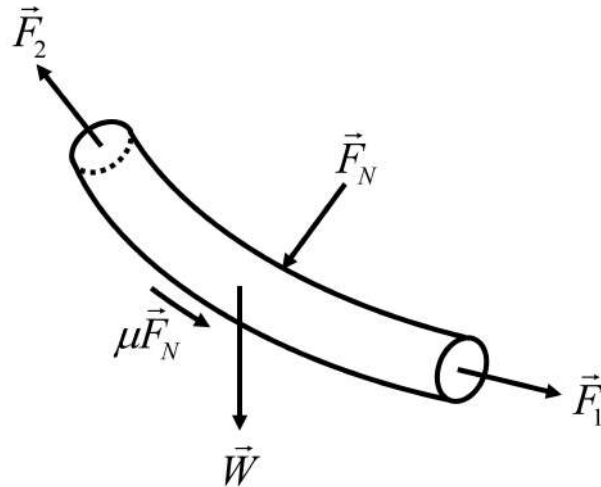
No caso mostrado na Figura 4.22, a força de atrito entre o conjunto coluna-broca e o leito de cascalho possui valores muito baixo e diminui à medida que o coluna sai da região em que há a presença do leito de cascalhos. Já a força de atrito devido a formação da pilha/plugue aumenta rapidamente quando há a formação do plugue pois está relacionada ao gradiente de pressão no interior do plugue. Como foi descrito na equação 3.39, a força normal depende da pressão no interior do plugue, ocasionada pelo escoamento do fluido por entre os cascalhos, e da área de contato entre o plugue e a parede do poço. Logo, quanto maior o comprimento do plugue e o coeficiente de atrito, maior será a força observada.

4.3 ESTUDO DE CASO

Para avaliar a influência da interação leito de cascalho e coluna foi realizado um estudo de caso no qual o modelo desenvolvido foi acoplado ao modelo *stiff-string* proposto por Mirhaj et al. (2016). Na modelagem desenvolvida por Mirhaj et al. (2016) o peso (W), a força de atrito ($\mu\vec{F}_N$) e a força devido a rigidez da coluna (F_{stiff}) são calculados para cada elemento, como representado na Equação 4.3 e ilustrado na Figura 4.24. A força de tração total para a retirada da coluna é obtida através da soma dessas forças do fundo do poço até a superfície.

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_1 + \vec{W} + \mu(\vec{F}_N + \vec{F}_{stiff}) \quad (4.3)$$

Figura 4.24 – Forças sobre um elemento da coluna durante a manobra de retirada da coluna de perfuração do poço. (Adaptado de Johancsik et al. (1984))



Fonte: Autoria própria.

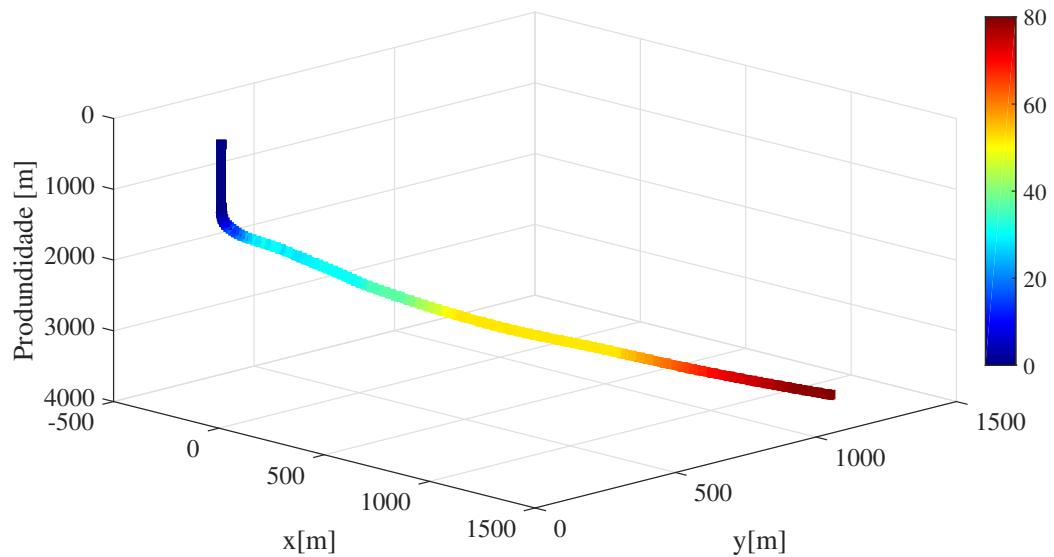
As forças devido a presença do leito de cascalho foram adicionadas para os elementos da coluna de perfuração em contato com o leito. A Equação 4.4 para a região onde há a formação do leito é escrita como:

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_1 + \vec{W} + \mu(\vec{F}_N + \vec{F}_{stiff}) + \vec{F}_T \quad (4.4)$$

em que \vec{F}_T é a força de tração necessária para a movimentação do elemento analisado na presença do leito de cascalho, calculada pela Equação 3.16 do modelo desenvolvido.

As dimensões do poço utilizado foram retiradas do trabalho de Tveitan (2011). Na análise da influência da presença de leito de cascalho foi considerado que na região do poço com inclinação maior que 70° haveria a formação de leito. Na Figura 4.25 é apresentada a geometria do poço. A inclinação em graus de cada trecho em relação ao eixo vertical é representada pela barra de cores variando de 0° à 80° .

Figura 4.25 – Geometria do poço utilizado para estudo de caso retirado do trabalho de Tveitan (2011) em que a escala de cores representa a variação da inclinação em graus de cada trecho do poço em relação ao eixo vertical da profundidade.



Fonte: Autoria própria.

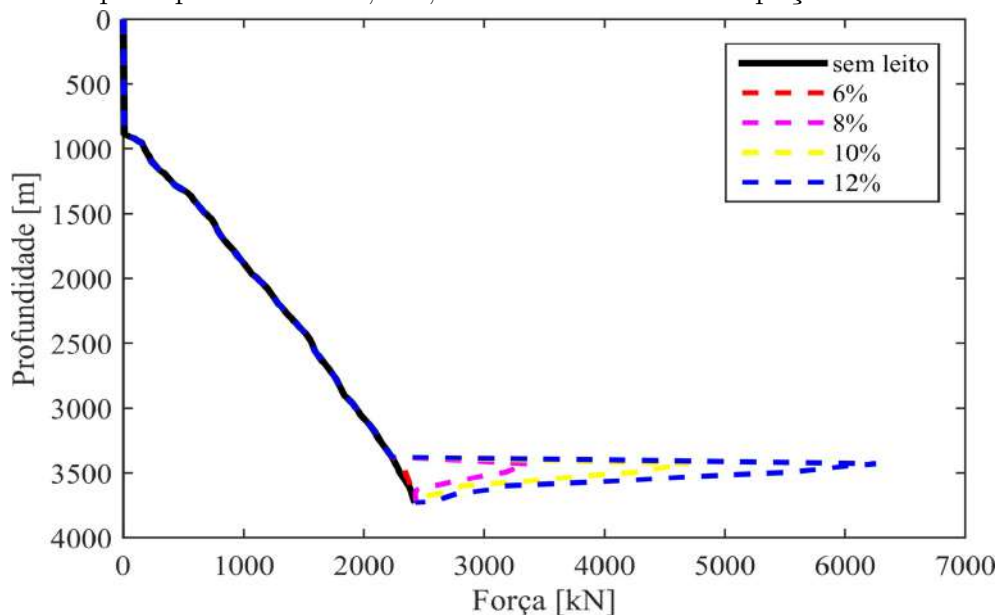
Os parâmetros utilizados para o cálculo dos resultados apresentados no estudo de caso estão listado na Tabela 4.7. Os dados do poço, coluna, broca e coeficiente de atrito foram baseados no trabalho de Tveitan (2011) e os outros parâmetros referentes ao fluido e as partículas foram baseados no trabalho de Peliano (2018).

Tabela 4.7 – Parâmetros utilizados para o estudo de caso

Parâmetros	Valores
ρ_p	2610 kg/m^3
d_p	3 mm
ϵ	0,35
ρ_f	1000 kg/m^3
η	0,001 $Pa.s$
$R_{poço}$	0,1 m
R_{coluna}	0,06 m
R_{broca}	0,095 m
L_{leito}	302,75 m
V_c	0,10 m/s
μ	0,2

O resultado da força de arrasto pela profundidade do poço é apresentada na Figura 4.26 no qual a linha preta representa a força de arrasto sem a presença de leito de cascalho e as linhas pontilhadas vermelha, rosa, amarela e azul consideram altura de leito correspondendo à 6%, 8%, 10% e 12% do raio do poço.

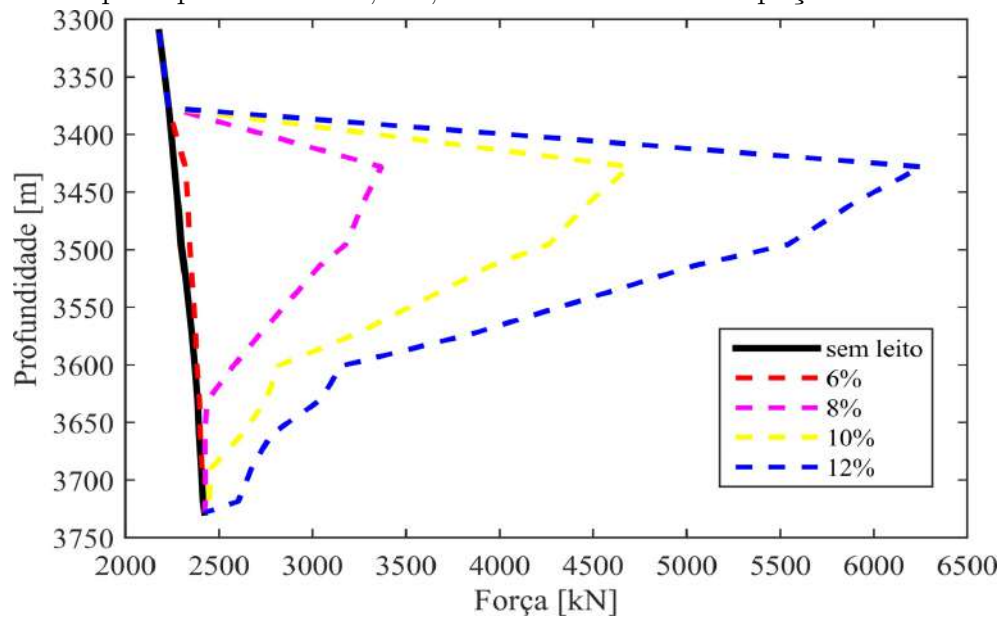
Figura 4.26 – Força de arrasto durante a retirada da coluna em função da profundidade comparando o resultado sem leito e com a presença de leito com alturas que representam 6%, 8%, 10% e 12% do raio do poço.



Fonte: Autoria própria.

Conforme exibido na Figura 4.26, à medida que a coluna é retirada do poço observa-se que na profundidade em que existe o leito de cascalhos entre 3400 m a 3700 m a força de arrasto apresenta um aumento. Para a maior altura de leito de 12% em azul, verifica-se que a força de arrasto aumenta rapidamente como pode ser observado a partir do fundo do poço até a profundidade de 3400 m. Em seguida a força de arrasto diminui já que a coluna sai da região de contato com o leito de cascalhos. Comportamento similar pode ser observado para a altura de leito de 10% em amarelo, porém a magnitude da força alcançada é menor na região da presença de leito de cascalho. Na Figura 4.27 são apresentados os mesmos resultados da Figura 4.26 destacando-se a região entre 3300 m a 3750 m, onde há o aumento da força de arrasto. Com a diminuição da altura de leito verifica-se que o aumento da força de arrasto é mais lento. Como pode ser observado para a altura de leito de 8% em rosa, a força de arrasto começa a aumentar somente a partir da profundidade de 3650 m e a magnitude da força alcançada é menor. Para a menor altura de leito de 6% em vermelho, o valor da força de arrasto é pouco afetado na região em que há a presença do leito de cascalho.

Figura 4.27 – Força de arrasto durante a retirada da coluna em função da profundidade comparando o resultado sem leito e com a presença de leito com alturas que representam 6%, 8%, 10% e 12% do raio do poço.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos a partir do estudo de caso revelam que para as condições do poço analisado quanto maior a altura do leito de cascalho maior será a força de arrasto observada sobre a coluna durante a passagem pela região em que há a presença do leito de cascalho. Como observado por Rasi et al. (1994) o aumento da força está relacionado à diminuição da área aberta do espaço anular, visto que, quanto maior a altura do leito menor será a área da região anular livre para a saída de cascalhos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi proposto um modelo matemático para calcular os esforços sobre a coluna de perfuração durante o deslocamento na presença de leito de cascalhos. Os resultados obtidos através do modelo foram comparados com os resultados experimentais de Peliano (2018). Através da comparação foi possível analisar a influência da velocidade de deslocamento da coluna, altura de leito e área aberta. Em seguida foi realizada a análise de sensibilidade do modelo à variação do ângulo de repouso das partículas e do coeficiente de atrito. Por fim foi apresentado um estudo de caso em que o modelo proposto foi acoplado ao modelo de Mirhaj et al. (2016) para contabilizar as forças devido a presença de leito de cascalhos durante a retirada da coluna do poço. A partir dos resultados discutidos foram obtidas as seguintes conclusões:

- O modelo foi capaz de representar qualitativamente as curvas da força de tração para o deslocamento do conjunto coluna-broca, com tendência similar ao observado experimentalmente, detectando a ocorrência ou ausência do plugue de cascalhos;
- As forças relacionadas à formação do plugue, força devido ao atrito entre a pilha/-plugue e a parede do poço e força devido ao gradiente de pressão, apresentaram maior influência no valor final da força de tração calculada pelo modelo;
- A velocidade de deslocamento do conjunto influencia na quantidade de cascalhos que sai do volume de controle definido. Os resultados apresentam melhor correlação com o experimental dependendo da condição de saída de cascalho considerada;
- A saída de cascalho do volume de controle possui grande influência na formação do plugue e conseqüentemente no cálculo dos esforços;
- A variação do ângulo de repouso não afeta significativamente os valores da força de tração mas interfere no instante de formação do plugue. Quanto maior o ângulo de repouso, mais cedo se observa a formação do plugue;
- O coeficiente de atrito afeta os valores da força de tração, pois está presente no cálculo da força de atrito entre a pilha/-plugue e a parede do poço, a força de maior influência do modelo. O aumento do coeficiente de atrito acarreta no aumento da força de tração;
- A partir do estudo de caso, verificou-se aumento da força de arraste na região em que há a presença de leito de cascalhos, como observado em campo por Fazelizadeh (2013).

A seguir são listadas sugestões para o aprimoramento do modelo em trabalhos futuros:

- Considerar a anisotropia do meio granular;
- Análise do escoamento do fluido através da pilha de cascalhos durante o seu desenvolvimento para que não ocorra o salto abrupto na curva da força de tração;
- Identificação e estudo aprofundado dos fenômenos envolvidos na saída de cascalhos e formação do plugue podem melhorar as estimativas da força de tração, para que não superestime nem subestime os esforços;
- Avaliação da influência da geometria detalhada da broca na saída de cascalho e formação do plugue;
- Utilização de outros modelos para o cálculo do gradiente de pressão em leito empacotado, considerando o escoamento de fluidos não-newtonianos;
- Comparação com resultados experimentais que melhor representem o problema real;
- Incluir a influência da rotação da broca.

REFERÊNCIAS

- AADNOY, B.; ANDERSEN, K. et al. Friction analysis for long-reach wells. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **IADC/SPE drilling conference**. [S.l.], 1998.
- AADNØY, B. S.; ANDERSEN, K. Design of oil wells using analytical friction models. **Journal of petroleum Science and Engineering**, Elsevier, v. 32, n. 1, p. 53–71, 2001.
- AADNOY, B. S.; FAZAELIZADEH, M.; HARELAND, G. et al. A 3d analytical model for wellbore friction. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, Society of Petroleum Engineers, v. 49, n. 10, p. 25–36, 2010.
- AL-HASHEMI, H. M. B.; AL-AMOUDI, O. S. B. A review on the angle of repose of granular materials. **Powder Technology**, Elsevier, v. 330, p. 397–417, 2018.
- ALLEN, K.; BACKSTRÖM, T. V.; KRÖGER, D. Packed bed pressure drop dependence on particle shape, size distribution, packing arrangement and roughness. **Powder Technology**, Elsevier, v. 246, p. 590–600, 2013.
- ALSHAIKH, A.; MAGANA-MORA, A.; GHARBI, S. A.; AL-YAMI, A. et al. Machine learning for detecting stuck pipe incidents: Data analytics and models evaluation. In: INTERNATIONAL PETROLEUM TECHNOLOGY CONFERENCE. **International Petroleum Technology Conference**. [S.l.], 2019.
- AMINA, N. S.; ALHALEEMB, A. A. Analysis of stuck pipe incidents in khabaz field. **Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering**, v. 19, n. 4, p. 47–53, 2018.
- ANDREOTTI, B.; FORTERRE, Y.; POULIQUEN, O. **Granular media: between fluid and solid**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013.
- BHALLA, K.; WALTON, I. et al. The effect of fluid flow on coiled tubing reach. **SPE production & facilities**, Society of Petroleum Engineers, v. 13, n. 01, p. 59–63, 1998.
- BOL, G. et al. Effect of mud composition on wear and friction of casing and tool joints. **SPE Drilling Engineering**, Society of Petroleum Engineers, v. 1, n. 05, p. 369–376, 1986.
- BRADLEY, W. et al. A task force approach to reducing stuck pipe costs. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE/IADC Drilling Conference**. [S.l.], 1991.
- BURKHARDT, J. et al. Wellbore pressure surges produced by pipe movement. **Journal of petroleum technology**, Society of Petroleum Engineers, v. 13, n. 06, p. 595–605, 1961.
- CARMAN, P. C. Fluid flow through granular beds. **Trans. Inst. Chem. Eng.**, v. 15, p. 150–166, 1937.
- CHIEZA, C. P. **Diagnósticos de problemas operacionais durante a perfuração de poços de petróleo**. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2011.
- DING, Y.; GRAVISH, N.; GOLDMAN, D. I. Drag induced lift in granular media. **Physical Review Letters**, APS, v. 106, n. 2, p. 028001, 2011.

DURAN, J. **Sands, powders, and grains: an introduction to the physics of granular materials**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chem. Eng. Prog.**, v. 48, p. 89–94, 1952.

ERGUN, S.; ORNING, A. A. Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. **Industrial & Engineering Chemistry**, ACS Publications, v. 41, n. 6, p. 1179–1184, 1949.

FAZAEELIZADEH, M. **Real Time Torque and Drag Analysis during Directional Drilling**. Tese (Doutorado) — University of Calgary, 2013.

FERNANDEZ, E. F. y; JUNIOR, O. A. P.; PINHO, A. C. de. **Dicionário do petróleo em língua portuguesa: exploração e produção de petróleo e gás uma colaboração Brasil, Portugal e Angola**. [S.l.]: Lixikon, 2009. Disponível em <<http://dicionariodopetroleo.com.br/>>. Acesso em: 19 Dez. 2020.

FONTENOT, J. E.; CLARK, R. et al. An improved method for calculating swab and surge pressures and circulating pressures in a drilling well. **Society of Petroleum Engineers Journal**, Society of Petroleum Engineers, v. 14, n. 05, p. 451–462, 1974.

GLOMSTAD, T. S. **Analysis of Hook load Signal to reveal the Causes of Restrictions**. Dissertação (Mestrado) — Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk, 2012.

GRAVISH, N.; UMBANHOWAR, P. B.; GOLDMAN, D. I. Force and flow transition in plowed granular media. **Physical review letters**, APS, v. 105, n. 12, p. 128301, 2010.

GRAVISH, N.; UMBANHOWAR, P. B.; GOLDMAN, D. I. Force and flow at the onset of drag in plowed granular media. **Physical Review E**, APS, v. 89, n. 4, p. 042202, 2014.

HERRMANN, H. J.; HOVI, J.-P.; LUDING, S. **Physics of dry granular media**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. v. 350.

HICKS, R. Pressure drop in packed beds of spheres. **Industrial & engineering chemistry fundamentals**, ACS Publications, v. 9, n. 3, p. 500–502, 1970.

HO, H. et al. An improved modeling program for computing the torque and drag in directional and deep wells. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. [S.l.], 1988.

JAEGER, H. M.; NAGEL, S. R.; BEHRINGER, R. P. Granular solids, liquids, and gases. **Reviews of modern physics**, APS, v. 68, n. 4, p. 1259, 1996.

JOHANCSIK, C.; FRIESEN, D.; DAWSON, R. et al. Torque and drag in directional wells—prediction and measurement. **Journal of Petroleum Technology**, Society of Petroleum Engineers, v. 36, n. 06, p. 987–992, 1984.

JOHNSON, E.; LAND, J.; LEE, M.; ROBERTSON, R. Landing the big one—the art of fishing. **Oilfield Review**, v. 24, n. 4, p. 26–35, 2013.

JONES, D.; KRIER, H. Gas flow resistance measurements through packed beds at high reynolds numbers. **Journal of Fluids Engineering**, American Society of Mechanical Engineers, v. 105, n. 2, p. 168–172, 1983.

- KOBAYAKAWA, M.; MIYAI, S.; TSUJI, T.; TANAKA, T. Local dilation and compaction of granular materials induced by plate drag. **Physical Review E**, APS, v. 98, n. 5, p. 052907, 2018.
- KUCS, R. J. W.; SPOERKER, H. F.; THONHAUSER, G.; ZOELLNER, P. et al. Automated real-time hookload and torque monitoring. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **IADC/SPE Drilling Conference**. [S.l.], 2008.
- LI, Z.; LIU, X.; ZHUO, D.; ZHANG, S. et al. A steady tension-torque model for drillstring in horizontal wells. Society of Petroleum Engineers, 1993.
- MAIDLA, E.; WOJTANOWICZ, A. et al. Field comparison of 2-d and 3-d methods for the borehole friction evaluation in directional wells. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. [S.l.], 1987.
- MAIDLA, E. E.; WOJTANOWICZ, A. K. et al. Laboratory study of borehole friction factor with a dynamic-filtration apparatus. **SPE drilling engineering**, Society of Petroleum Engineers, v. 5, n. 03, p. 247–255, 1990.
- MASON, C.; CHEN, D. C. et al. Step changes needed to modernise T&D software. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE/IADC Drilling Conference**. [S.l.], 2007.
- MCCORMICK, J.; WILCOX, D. et al. A work method to analyzing friction factors in torque and drag modeling. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Unconventional Resources Conference Canada**. [S.l.], 2013.
- MENAND, S. et al. Advancements in 3d drillstring mechanics: from the bit to the top-drive. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **IADC/SPE drilling conference**. [S.l.], 2006.
- MIMS, M.; KREPP, T.; WILLIAMS, H.; CONWELL, R.; NAVARRO, A. **Drilling design and implementation for extended reach and complex wells**. 3. ed. [S.l.]: K&M Technology Group, 2003.
- MIRHAJ, S.; KAARSTAD, E.; AADNOY, B. et al. Torque and drag modeling; soft-string versus stiff-string models. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition**. [S.l.], 2016.
- MITCHELL, R. F.; BJORSET, A.; GRINDHAUG, G. et al. Drillstring analysis with a discrete torque/drag model. **SPE Drilling & Completion**, Society of Petroleum Engineers, v. 30, n. 01, p. 5–16, 2015.
- MITCHELL, R. F.; SAMUEL, R. et al. How good is the torque/drag model? **SPE Drilling & Completion**, Society of Petroleum Engineers, v. 24, n. 01, p. 62–71, 2009.
- MME, U.; PAL, S. Effects of mud properties, hole size, drill string tripping speed and configurations on swab and surge pressure magnitude during drilling operations. **International Journal of Petroleum Science and Thecnology**, v. 5, p. 143–153, 2012.
- MONTILLET, A.; AKKARI, E.; COMITI, J. About a correlating equation for predicting pressure drops through packed beds of spheres in a large range of reynolds numbers. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Elsevier, v. 46, n. 4, p. 329–333, 2007.

- MUQEEM, M. A.; WEEKSE, A. E.; AL-HAJJI, A. A. et al. Stuck pipe best practices—a challenging approach to reducing stuck pipe costs. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition**. [S.l.], 2012.
- PAYNE, M.; ABBASSIAN, F. et al. Advanced torque and drag considerations in extended-reach wells. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE/IADC Drilling Conference**. [S.l.], 1996.
- PELIANO, S. V. **Análise experimental do arrasto em colunas de perfuração parcialmente imersas em leito de cascalhos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- PETROBRAS. **Completamos dez anos de produção no pré-sal**. 2018. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/completamos-dez-anos-de-producao-no-pre-sal.htm>>. Acesso em: 03 Dez. 2019.
- PIÑEIRO, G.; PERELMAN, S.; GUERSCHMAN, J. P.; PARUELO, J. M. How to evaluate models: observed vs. predicted or predicted vs. observed? **Ecological Modelling**, Elsevier, v. 216, n. 3-4, p. 316–322, 2008.
- RASI, M. et al. Hole cleaning in large, high-angle wellbores. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE/IADC Drilling Conference**. [S.l.], 1994.
- ROCHA, L.; AZUAGA, D.; ANDRADE, R.; VIEIRA, J.; SANTOS, O. Perfuração direcional, 3ª edição. **Editora Interciência, RJ**, 2011.
- SALMINEN, K.; CHEATHAM, C.; SMITH, M.; VALIULLIN, K. et al. Stuck-pipe prediction by use of automated real-time modeling and data analysis. **SPE Drilling & Completion**, Society of Petroleum Engineers, v. 32, n. 03, p. 184–193, 2017.
- SHADIZADEH, S.; KARIMI, F.; ZOVEIDAVIANPOOR, M. Drilling stuck pipe prediction in iranian oil fields: An artificial neural network approach. **Iranian Journal of Chemical Engineering**, v. 7, n. 4, p. 29–41, 2010.
- SHEPPARD, M.; WICK, C.; BURGESS, T. et al. Designing well paths to reduce drag and torque. **SPE Drilling Engineering**, Society of Petroleum Engineers, v. 2, n. 04, p. 344–350, 1987.
- SPE. **Mechanical pipe sticking**. 2015. Disponível em <http://petrowiki.org/Mechanical_pipe_sticking>. Acesso em: 24 Set. 2018.
- TVEITAN, K. **Torque and drag analyses of North Sea wells using new 3D model**. Dissertação (Mestrado) — University of Stavanger, Norway, 2011.
- YARIM, G.; UCHYTIL, R. J.; MAY, R. B.; TREJO, A. et al. Stuck pipe prevention—a proactive solution to an old problem. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. [S.l.], 2007.
- ZAKARIYA, R. et al. A case study of real-time drilling optimization to improve well delivery through enhancing drilling rates and identifying invisible lost time to improve performance. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE North Africa Technical Conference and Exhibition**. [S.l.], 2015.