

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

**SAUL VIEIRA PELIANO**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ARRASTO EM COLUNAS DE  
PERFURAÇÃO PARCIALMENTE IMERSAS  
EM LEITO DE CASCALHOS**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA  
2018**

**SAUL VIEIRA PELIANO**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ARRASTO EM COLUNAS DE  
PERFURAÇÃO PARCIALMENTE IMERSAS  
EM LEITO DE CASCALHOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial de aprovação.

Área de concentração: Engenharia Térmica

**Orientador:** Cezar Otaviano Ribeiro  
Negrão, Ph.D.

**CURITIBA**

**2018**

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

B324m Peliano, Saul Vieira  
2018 Análise experimental do arrasto em colunas de perfuração  
parcialmente imersas em leito de cascalhos / Cezar  
Otaviano Ribeiro Negrão.-- 2018.  
1 arquivo de texto : PDF : 2,87 MB

Disponível via World Wide Web  
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, 2018  
Bibliografia: p. 76-77

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Engenharia  
térmica. 3. Arrasto (Aerodinâmica). 4. Poços de petróleo  
- Perfuração. 5. Perfuração direcional. 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. 22 -- 620.1

---

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba  
Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271

## TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº340

A Dissertação de Mestrado intitulada: **Análise Experimental do Arrasto em Colunas de Perfuração Parcialmente Imersas em Leito de Cascalhos**, defendida em sessão pública pelo Candidato **Saul Vieira Peliano**, no dia 30 de novembro de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Engenharia Térmica, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

### BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Eduardo Matos Germer - UTFPR

Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas - UFPR

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, \_\_\_\_ DE \_\_\_\_\_ DE 20\_\_.

**Carimbo e assinatura do Coordenador do Programa**

---

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria Eimar L. Vieira e Luiz A. P. Peliano, as minhas irmãs, Sarah V. Peliano e Isadora V. Peliano, pelo amor e apoio incondicional nos momentos adversos ao longo da minha vida.

A minha namorada Lislle Kuritza Rockenbach pelo amor, carinho e apoio. Agradeço também pelos momentos alegres e descontraídos, que tornaram minha jornada mais prazerosa.

Ao Banzé por ter me acompanhado durante toda a minha jornada acadêmica.

Ao meu amigo Holmes Ripoll pelas festas e companheirismo. Agradeço também por se mostrar sempre solícito nos momentos difíceis.

As minhas amigas Isa Borghetti e Julia Vergopolan, por terem facilitado a minha adaptação em Curitiba. Sou grato também pela convivência harmoniosa que tivemos durante este período e pelas inúmeras caronas do “vovô”, que teve papel fundamental na construção da unidade experimental.

Ao meu orientador Cezar O. R. Negrão pela oportunidade de ampliar meus horizontes e desenvolver um trabalho à nível de mestrado, pela orientação, amizade, conselhos e, principalmente, pela paciência.

Aos meus amigos, João, Leon, Tiê, Bernardo, Gabriel, Aniel e Kneipp por terem me visitado em Curitiba durante o mestrado.

Aos membros da banca Prof. Eduardo Matos Germer e Prof. José Viriato Coelho Vargas pelas sugestões e contribuições.

Ao Ricardo Knesebeck pela ajuda durante a realização dos experimentos.

A todos os membros do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN).

PELIANO, SAUL VIEIRA. **Análise experimental do arrasto em colunas de perfuração parcialmente imersas em leito de cascalhos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 77 páginas, 2018.

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar experimentalmente a força de arrasto sobre uma coluna de perfuração, enquanto esta se movimenta ao longo de um poço horizontal parcialmente preenchido por um leito de cascalhos. Para isto, foi construída uma unidade experimental que reproduz um poço horizontal e suas características essenciais. Além disso, o aparato permite movimentar axialmente a réplica da coluna de perfuração ao longo do poço e monitorar a força de tração aplicada à coluna durante o deslocamento. Dessa forma, foi avaliada a sensibilidade da força de arrasto diante da variação de três parâmetros intrínsecos ao problema: a altura do leito de cascalhos, a área transversal da broca e a velocidade de translação da coluna. Os resultados indicaram que a elevação da altura do leito de cascalhos corresponde ao aumento da força de arrasto devido a dois fatores: o aumento da área de contato entre a coluna e o leito; e, a elevação do comprimento do plugue de cascalhos formado. A combinação destes dois fatores representou um aumento máximo de 267 % na força de arrasto para um incremento de 80 % na altura do leito. O aumento da área transversal da broca também significou o aumento da força de arrasto em decorrência da elevação do comprimento do plugue e, para alguns casos, ocasionou o aprisionamento da coluna. Por fim, o aumento da velocidade de translação da coluna culminou na redução do comprimento do plugue para todos os casos analisados, o que representou uma redução de até 53 % da força de arrasto. No entanto, em alguns testes a redução do comprimento do plugue não significou o decréscimo da força de arrasto.

**Palavra-chave:** arrasto, leito de cascalhos, poços horizontais.

PELIANO, SAUL PELIANO. **Análise experimental do arrasto em colunas de perfuração parcialmente imersas em leito de cascalhos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 77 páginas, 2018.

## **ABSTRACT**

The present work evaluated experimentally the drag's force on a drill string, while it's pulling out of horizontal well partially filled with cuttings bed. For accomplish this task, it was constructed an experimental unit that reproduces a horizontal well and its essential characteristics. Furthermore, the apparatus allows axial movement of the column into the well and the monitoring of the force of traction applied in the drill string. Thus, it was evaluated the sensibility of the drag force to the variation of three parameters intrinsic to the problem: the cuttings bed's height; the cross-sectional area of the bit; and, the columns translation velocity. The results indicated that the elevation of cuttings bed's height causes the increase of the drag due to two factors: the elevation of the contact area between the column and the cuttings bed; and, the increase of cuttings plug's length. The combination of these factors represented a maximum increase of 267% in drag's force for an 80% elevation in cuttings bed's height. The enlargement of bit's cross-sectional area represented as well the increase of drag due to the augmentation of plug's length and, in some cases, resulted in the stuck column. Lastly, the increase of drill string's velocity represented a reduction of cuttings plug's length for all cases studied, which meant a reduction of 53% of drag. However, in some tests the reduction of cuttings bed's length did not mean decrease of drag.

**Key words:** drag, cuttings bed, horizontal wells.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Plano de Negócios e Gestão 2017-2021 da Petrobras.....	15
Figura 1.2 – Perfuração direcional. Localização da zona de interesse. ....	15
Figura 1.3 – Aplicação de poço direcionais: (a) vários poços perfurados a partir de um única cabeça de poço; (b) poço de alívio; (c) poços multilaterais de alívio. Autoria própria.....	16
Figura 1.4 – Exemplos de componentes de um BHA. ....	17
Figura 1.5 – Trajetória percorrida pelo fluido de perfuração durante a perfuração. Autoria própria .....	18
Figura 1.6 – Leito de cascalhos em poços direcionais. Adaptado de Sifferman et al (1990).....	19
Figura 1.7 – Diagrama de forças da coluna de perfuração.....	20
Figura 1.8 – Formação do plugue durante uma manobra: (a) posição inicial da coluna de perfuração; (b) escoamento de fluido e cascalhos durante o deslocamento da coluna de perfuração; (c) plugue formado. Autoria própria .....	21
Figura 2.1 – Diagrama de forças sobre um segmento da coluna de perfuração. Autoria própria.....	24
Figura 3.1 – Disposição dos elementos principais da unidade experimental: (a) posição inicial de teste; (b) posição final de teste. Autoria própria.....	33
Figura 3.2 – Esquema da unidade experimental. Autoria própria.....	34
Figura 3.3 – Dimensões principais da estrutura de alumínio do aparato experimental. Autoria própria. ....	35
Figura 3.4 – Disposição dos elementos estruturais: (a) suporte da tubulação, placa de aço e sapata; (b) mancais, guia linear e placa de aço. Autoria própria.....	36
Figura 3.5 – Elementos do sistema hidráulico: (a) flange de aço inox com redutor; (b) flange de aço inox com vedação. Autoria própria.....	37
Figura 3.6 – Aberturas (escotilhas) de acesso ao interior da tubulação de acrílico. Autoria própria.....	37
Figura 3.7 – Disposição do tanque, da bomba pneumática, das válvulas e da tubulação de PVC. Autoria própria.....	38
Figura 3.8 – Disposição dos elementos do sistema de movimentação: (a) subsistema de rotação: motor; (b) subsistema de translação: servo motor, redutor, eixo e engrenagens; (c) conexões entre redutor, a célula de carga e a placa suporte. Autoria própria.....	39
Figura 3.9 – Fixação da célula de carga ao redutor e ao bloco de aço através do olhal e de um parafuso, respectivamente. Autoria própria. ....	40
Figura 3.10 – Elementos do sistema de controle e medição: (a) chassi e placas de aquisição de sinais; (b) inversores e fonte de 24 V. Autoria própria. ....	41
Figura 3.11 – Interface LabVIEW. Autoria própria. ....	42
Figura 3.12 – Interfaces do lightning: (a) interface I; (b) interface II. Autoria própria. ....	42
Figura 3.13 – Esquema do teste de elevação de carga. Autoria própria. ....	44
Figura 3.14 – Teste de carga para a velocidade de 10 cm/s. ....	45
Figura 3.15 – Atenuação da oscilação da tração com o auxílio da média móvel.....	46



Figura 3.16 – Etapas do nivelamento do leito: (a) posição inicial dos elementos; (b) inserção dos cascalhos através da escotilha; (c) nivelamento do leito; (d) configuração final do leito; (e) posição final dos elementos e leito nivelado. Autoria própria. ....	48
Figura 3.17 – Localização dos orifícios nas escotilhas e na coluna de alumínio. Autoria própria.....	48
Figura 4.1 – Comportamento do leito durante os testes: (a) posição inicial de teste; (b) acúmulo de cascalhos junto a broca; (c) aprisionamento causado pelo plugue; (d) plugue e coluna na posição final de teste; (e) coluna e acúmulo de cascalhos na posição final de teste. Autoria própria. ....	51
Figura 4.2 – Comprimento do plugue. Autoria própria. ....	52
Figura 4.3 – Interpretação dos resultados de um teste em que não houve formação de plugue. ....	54
Figura 4.4 – Interpretação dos resultados de um teste em que houve a formação do plugue e não aprisionamento da coluna.....	55
Figura 4.5 – Interpretação dos resultados de um teste em que ocorreu aprisionamento da coluna devido a formação do plugue. ....	56
Figura 4.6 – Corte transversal da seção de testes, evidenciando as alturas de leito utilizadas. Autoria própria.....	57
Figura 4.7 – Detalhes dos experimentos: (a) broca do tipo 1; (b) leito formado com as esferas de vidro. Autoria própria .....	58
Figura 4.8 – Comparação entre as etapas iniciais dos testes de arrasto executados para as alturas H3, H2 e H1 .....	59
Figura 4.9 – Ajuste dos pontos experimentais da Tabela 4.2. ....	60
Figura 4.10 – Força de arrasto no regime permanente em função do comprimento do plugue. ....	61
Figura 4.11 – Força de atrito entre a tubulação e o plugue. ....	62
Figura 4.12 – Força decorrente do escoamento da água através do plugue.....	62
Figura 4.13 – Testes realizados com a broca do tipo 2 para 4 alturas de leito distintas .....	65
Figura 4.14 – Ajuste dos dados expostos na Tabela 4.5. ....	66
Figura 4.15 – Ajuste dos dados expostos na Tabela 4.6. ....	67
Figura 4.16 – Corte transversal e longitudinal da seção de testes: (a) área de escoamento do fluido e dos cascalhos; (b) perfil de velocidades na região superior da broca .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resultados dos testes de elevação de carga para velocidade igual à 10 cm/s.....	46
Tabela 4.1 – Matriz de testes para avaliação da altura de leito .....	58
Tabela 4.2 - Dados de incerteza expandida para os testes apresentados na Figura 4.8.....	59
Tabela 4.3 – Relação entre a área de contato entre a coluna e o leito e a força de tração média para as alturas H3, H2 e H1. ....	60
Tabela 4.4 – Matriz de testes para avaliação da área transversal da broca .....	63
Tabela 4.5 – Resultados dos testes de arrasto realizados com as brocas do tipo 1 e 2 para a velocidade de 10 cm/s. ....	64
Tabela 4.6 – Força de arrasto em função de $A_{TB} / A_L$ para a broca do tipo 2. ....	66
Tabela 4.7 – Força de arrasto em função de $A_{TB} / A_L$ para a broca do tipo 1. ....	67
Tabela 4.8 – Matriz de testes para a avaliação da velocidade de translação.....	68
Tabela 4.9 – Resultados dos testes de arrasto realizados com a broca do tipo 1 e altura de leito H3. ....	69
Tabela 4.10 – Resultados dos testes de arrasto realizados com a broca do tipo 1 e altura de leito H2. ....	69
Tabela 4.11 – Resultados dos testes de arrasto realizados com a broca do tipo 1 e altura H1.....	69
Tabela 4.12 – Resultados dos testes de arrasto realizados com a broca do tipo 2 e altura H4.....	70

## NOMENCLATURA

$H_{crit}$	Altura crítica do leito de cascalhos.	Mm
$H$	Altura de leito.	N
$\theta$	Ângulo azimute do segmento da coluna de perfuração.	°
$\alpha$	Ângulo de inclinação do segmento da coluna de perfuração.	°
$A_{TB}$	Área transversal da broca.	mm <sup>2</sup>
$A$	Área transversal do meio poroso.	m <sup>2</sup>
$A_L$	Área transversal livre do poço.	mm <sup>2</sup>
$\Delta M$	Aumento de torque em relação ao comprimento do segmento da coluna de perfuração.	N.m
$\Delta F_t$	Aumento de tração em relação ao comprimento do segmento da coluna de perfuração.	N
$\Delta \theta$	Aumento do ângulo azimute em relação ao comprimento do segmento da coluna de perfuração.	°
$\Delta \alpha$	Aumento do ângulo de inclinação em relação ao comprimento do segmento da coluna de perfuração.	°
$\mu$	Coeficiente de atrito entre as paredes do poço e a coluna de perfuração.	-
$R^2$	Coeficiente de determinação.	
$L_P$	Comprimento do plugue.	Cm
$s_{TM}$	Desvio padrão	N
$L_B$	Distância percorrida pela broca.	cm
$F_a$	Força de arrasto.	N
$F_{at}$	Força de atrito entre o plugue e as paredes da tubulação de acrílico.	N
$F_t$	Força de tração aplicada sobre o segmento da coluna de perfuração.	N
$F_e$	Força devido ao escoamento.	N
$F_n$	Força normal entre as paredes do poço e a coluna de perfuração.	N
$P_C$	Força peso da carga.	N
$\Delta p$	Gradiente de pressão no meio poroso.	N/+2m <sup>2</sup>
$HCR$	Hole cleaning ratio.	N
$U_{TM}$	Incerteza expandida.	-
$s_{TM}$	Incerteza padrão aleatória	N
$b_{TM}$	Incerteza sistemática.	N
$m_C$	Massa da carga elevada.	Kg
$k$	Permeabilidade.	D
$W$	Peso do segmento da coluna de perfuração.	N
$M$	Torque aplicado ao segmento da coluna.	N.m
$T_M$	Valor médio da tração.	
$q$	Vazão.	m <sup>3</sup> /s
$\mu_F$	Viscosidade do fluido.	N

## SUMÁRIO

1.	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	14
1.1.	Perfuração direcional .....	15
1.2.	Limpeza de poços direcionais .....	17
1.3.	Definição do problema .....	19
1.4.	Objetivos gerais.....	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
2.1.	Modelagem do torque e arrasto .....	23
2.2.	Arrasto em colunas de perfuração: estudos experimentais.....	29
2.3.	Síntese do capítulo.....	31
2.4.	Objetivos específicos .....	32
3.	DESCRIÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL .....	33
3.1.	Descrição geral da unidade experimental .....	33
3.2.	Detalhamento dos componentes.....	34
3.2.1.	Sistema estrutural.....	35
3.2.2.	Sistema hidráulico .....	36
3.2.3.	Sistema de movimentação.....	38
3.2.4.	Sistema de controle e medição.....	40
3.3.	Funcionamento da unidade experimental .....	41
3.4.	Verificação do aparato experimental .....	43
3.4.1.	Verificação de calibração da célula de carga .....	43
3.4.2.	Verificação da célula de carga acoplada à unidade experimental .....	43
3.5.	Procedimento experimental.....	47
4.	RESULTADOS.....	50

4.1.	Análise do comportamento do leito de cascalhos .....	50
4.2.	Interpretação dos testes de arrasto.....	52
4.3.	Influência da altura do leito sobre o arrasto .....	57
4.4.	Influência da área transversal da broca sobre o arrasto .....	63
4.5.	Influência da velocidade de translação .....	67
5.	Conclusões .....	71
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros.....	72
	REFERÊNCIAS .....	74
	APÊNDICE A. VERIFICAÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL.....	76

## 1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A Primeira Revolução Industrial acelerou a produção de bens materiais e, conseqüentemente, elevou a demanda por energia primária. Neste período, a fonte energética era constituída exclusivamente por carvão, o que se manteve inalterado até a Segunda Revolução Industrial, momento no qual o petróleo virou protagonista devido à invenção do motor a combustão. Desde então, a matriz energética mundial é composta predominantemente por combustíveis fósseis, dentre eles: o carvão mineral, o petróleo e o gás natural. De acordo com o Conselho Mundial de Energia (2016), estes correspondem à 86% de toda energia consumida no mundo.

A dependência por estes recursos não-renováveis gerou o esgotamento das reservas mais acessíveis e rentáveis, ditas convencionais, o que conduziu a exploração para cenários mais complexos. Na indústria do petróleo isto significou ampliar a fronteira exploratória para o mar, como ocorreu no Golfo do México, no Mar do Norte e na costa brasileira. Tais cenários impõem uma série de desafios operacionais durante a exploração e produção de petróleo e gás natural, dentre estes destacam-se: temperaturas e pressões elevadas no reservatório; salinidade da água do mar; distância das plataformas de exploração ao continente; profundidade dos reservatórios; e, a extensão da lâmina d'água. Estas características elevam de forma significativa o custo e a periculosidade das operações desenvolvidas.

Tendo isto em vista, a indústria petrolífera busca continuamente a melhoria dos equipamentos e técnicas de exploração e produção de petróleo, com a finalidade de superar os entraves operacionais inerentes ao cenário *offshore*, assegurando assim, a viabilidade econômica dos reservatórios explorados nestas áreas. No Brasil, a Petrobras vem enfrentando desafios crescentes a medida em que a extensão e complexidade dos poços aumenta, o que demanda novos investimentos em pesquisa e tecnologia.

A necessidade de investimentos no setor é comprovada pelo mais recente Plano de Gestão e Negócios da Petrobras, divulgado em 2016, documento no qual a empresa determina que 82% dos recursos deverão ser destinados à exploração e produção com ênfase em águas profundas entre 2017 e 2021, conforme indica a Figura 1.1. Tal fato

comprova o interesse econômico da companhia nesta atividade, mesmo diante da elevada desvalorização do barril de petróleo Brent iniciada em 2014.

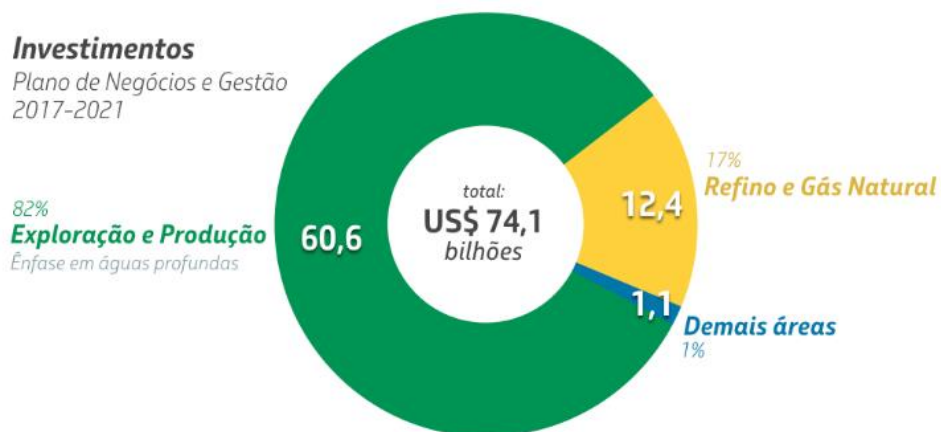


Figura 1.1 – Plano de Negócios e Gestão 2017-2021 da Petrobras.

### 1.1. Perfuração direcional

A perfuração direcional é uma técnica empregada na exploração de reservatórios de petróleo devido à versatilidade de sua aplicação e a redução de custos que esta proporciona. Quando utilizada, permite que o poço atinja áreas de interesse com coordenadas geográficas distintas em relação as da cabeça do poço, conforme ilustrado na Figura 1.2.

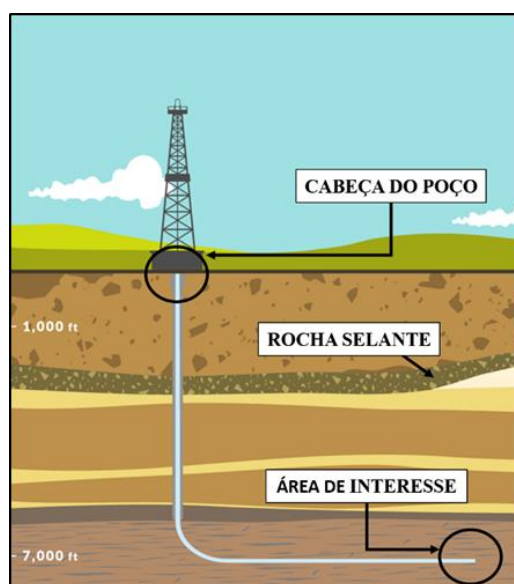


Figura 1.2 – Ilustração de perfuração direcional. Localização da zona de interesse.

Tal técnica permite a exploração de determinada região do reservatório a partir da mesma cabeça de poço, situação na qual poços vizinhos são perfurados lado a lado separados por pequenas distâncias, como exibido na Figura 1.3 a. Isto reduz o montante gasto em equipamentos devido à utilização da mesma linha de produção para inúmeros poços (ROCHA et al., 2011). Além disso, esta técnica de perfuração também pode ser empregada no controle de um *blowout* – fluxo descontrolado de fluidos da formação rochosa para o espaço anular – em casos em que não é possível acessar o poço devido às avarias na plataforma. Nestas situações, perfura-se um poço direcional de alívio até que o mesmo atinja o que está em *blowout*, possibilitando assim, a injeção de fluidos capazes de remediar a situação, conforme indicado na Figura 1.3 b. Por fim, a perfuração direcional possibilita a implantação de poços multilaterais e horizontais, que elevam significativamente a área de exposição dos reservatórios e, conseqüentemente, sua produtividade através do aumento da área de drenagem, o que pode ser notado na Figura 1.3 c.

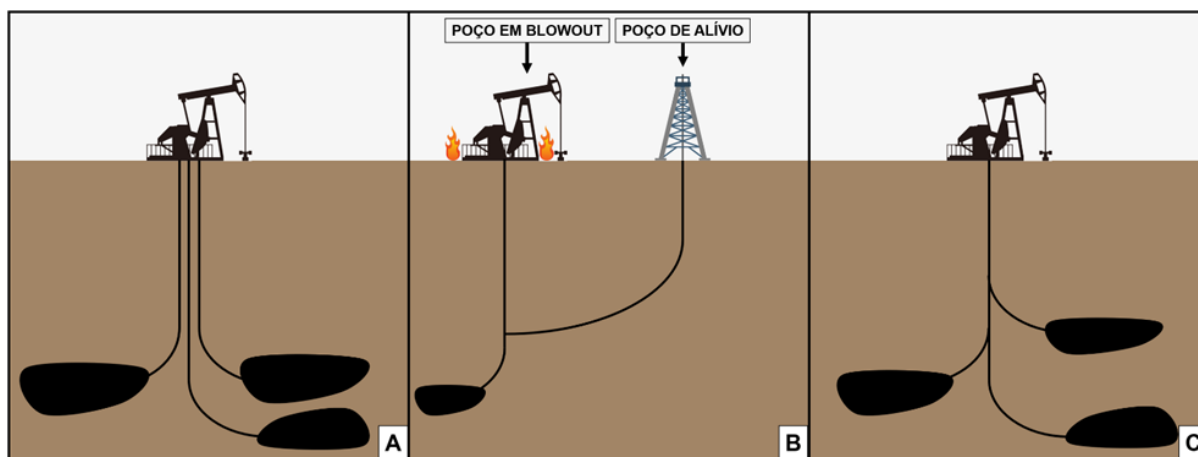


Figura 1.3 – Aplicação de poços direcionais: (a) vários poços perfurados a partir de uma única cabeça de poço; (b) poço de alívio; (c) poços multilaterais de alívio. Autoria própria.

Para obter a trajetória desejada durante a perfuração direcional é necessário equipar a coluna com elementos específicos, que proporcionem o aumento ou a redução da inclinação. Uma das maneiras de manipular esta variável se dá por meio da alteração do posicionamento do estabilizador (ROCHA et al., 2011). Quando acoplado próximo à broca, promove o aumento da angulação; fixado longe dela, proporciona a diminuição da



inclinação; e, inúmeros estabilizadores conectados ao longo da coluna mantêm a perfuração em linha reta.

Adicionalmente à broca e aos estabilizadores, outros equipamentos podem ser conectados à coluna de perfuração de um poço direcional, conforme indicado na Figura 1.4, dentre eles: os comandos, responsáveis por fornecer peso sobre a broca e promover rigidez para a coluna, permitindo assim, o melhor controle da trajetória (THOMAS et al., 2004); o motor de fundo, utilizado para aumentar a rotação da broca (ROCHA et al., 2011); o alargador, capaz de aumentar o diâmetro do poço durante a perfuração (THOMAS et al., 2004); o substituto curvado, que é utilizado para variar a inclinação do poço (ROCHA et al., 2011); e, equipamentos de perfilagem, utilizados para determinar a real trajetória do poço, pressão de poros da formação, tipo de fluido presente nas rochas, entre outros. A esse conjunto de equipamentos, dá-se o nome de composição de fundo ou *bottom hole assembly* (BHA).

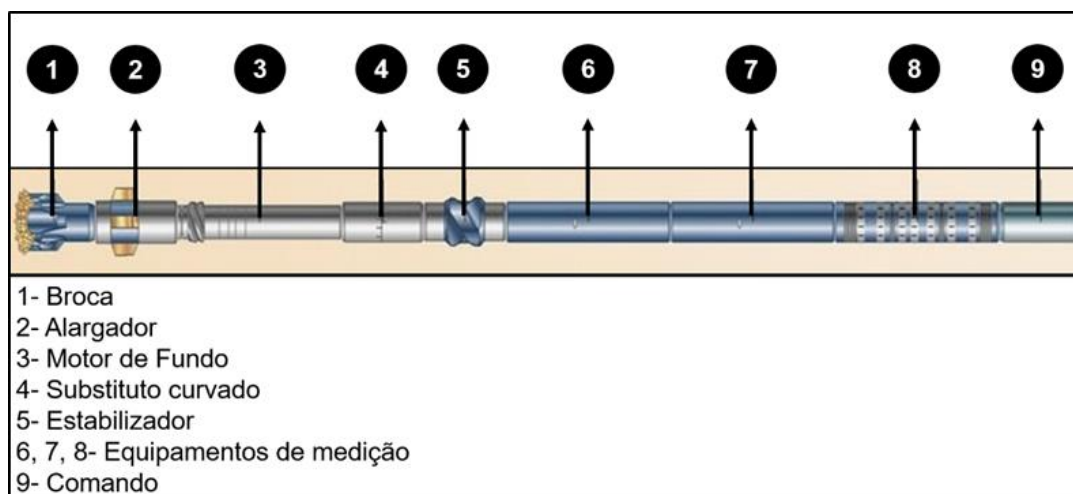


Figura 1.4 – Exemplos de componentes de um BHA. Adaptado de Drilling Contractor.

## 1.2. Limpeza de poços direcionais

A perfuração de um poço de petróleo se dá por meio da aplicação de peso e rotação sobre a broca, quando esta entra em contato com a formação rochosa. À medida em que a broca avança, fragmentos de rocha são gerados constantemente. Tais partículas, mais conhecidas como cascalhos, devem ser retiradas do poço para mantê-lo limpo. Este procedimento é conhecido como limpeza de poço e consiste na remoção dos cascalhos

por meio da circulação do fluido de perfuração, que escoar no interior da coluna em direção ao fundo do poço e retorna à superfície transportando os fragmentos pelo espaço anular. A Figura 1.5 indica a trajetória percorrida pelo fluido durante a perfuração.

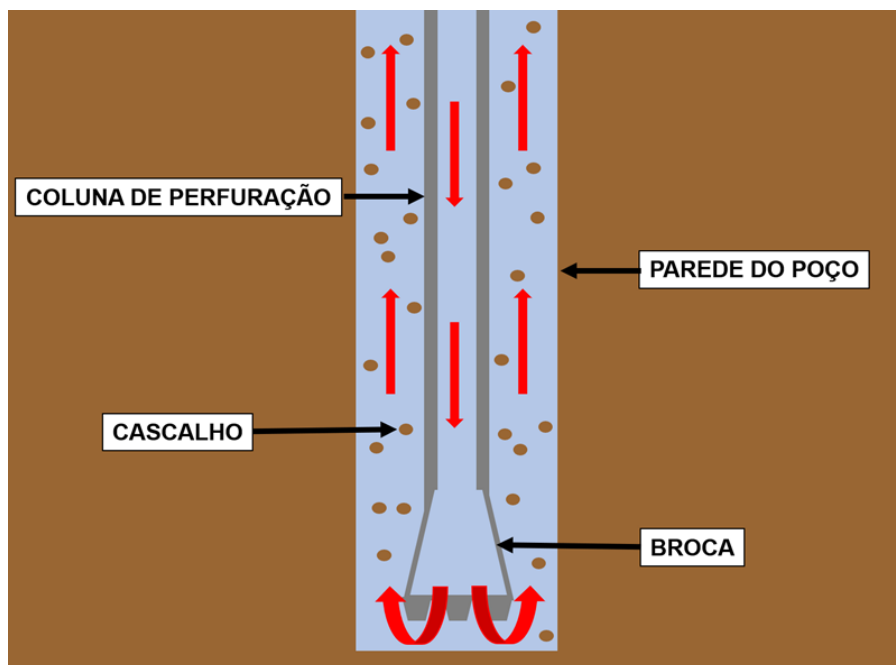


Figura 1.5 - Trajetória percorrida pelo fluido de perfuração durante a perfuração.  
Autoria própria.

De acordo com SIFFERMAN (1990), inúmeros parâmetros da perfuração estão ligados à qualidade da limpeza do poço, dentre estes, os de maior relevância são: a velocidade de escoamento; o peso específico e as propriedades reológicas do fluido; a inclinação do poço; a velocidade de rotação da coluna e sua excentricidade; e, a granulometria dos cascalhos. Essas variáveis devem ser monitoradas constantemente em poços inclinados e de grande extensão, devido à preocupação com a possibilidade de formação de um leito de partículas na região inferior do poço. Este fenômeno ocorre devido à redução da componente vertical da velocidade de escoamento do fluido em comparação à observada em um poço vertical sob as mesmas condições (SIFFERMAN, 1990). Tal situação reduz a capacidade do fluido em transportar as partículas sólidas para a superfície e, conseqüentemente, aumenta a velocidade de sedimentação destas. Adicionalmente, nota-se dificuldade no carreamento dos cascalhos que se encontram próximos às paredes do poço em virtude das baixas velocidades do escoamento nestas regiões. A Figura 1.6 ilustra o leito de cascalho em poços com inclinações distintas.

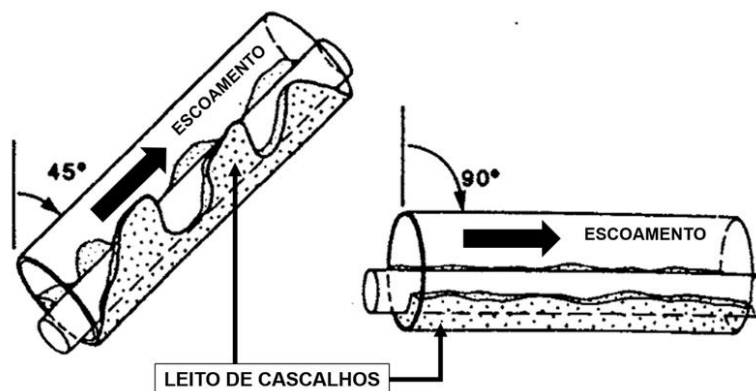


Figura 1.6 – Leito de cascalhos em poços direcionais. Adaptado de Sifferman et. al (1990).

Para inclinações inferiores a  $45^\circ$  o leito escoá de maneira satisfatória ao longo do poço, para valores superiores a  $60^\circ$ , isto não ocorre, pois o leito se mostra bem compacto (SIFFERMAN, 1990). Portanto, a limpeza do poço é mais difícil a medida em que este se aproxima da horizontal e problemas associados à presença do leito tornam-se mais frequentes. Dentre os problemas associados à presença do leito, COSTA (2006) destaca os seguintes:

- a) Redução da taxa de penetração;
- b) Desgaste prematuro da broca;
- c) Perda de circulação;
- d) Obstrução do anular;
- e) Prisão da coluna de perfuração;
- f) Fraturamento da formação;
- g) Torque excessivo da coluna de perfuração;
- h) Forças de arrasto na coluna de perfuração e nos revestimentos.

### 1.3. Definição do problema

Com o intuito de garantir a eficiência e a segurança operacional, a coluna de perfuração deve ser dimensionada para suportar esforços mecânicos durante a perfuração. Os valores de torque ( $M$ ) e arrasto ( $F_A$ ) são gerados, principalmente, pelo contato da coluna com as paredes do poço e/ou revestimentos (MITCHELL et al., 2007)

e devem ser monitorados constantemente durante a perfuração. Na Figura 1.7 estão indicadas as forças que atuam sobre um segmento da coluna em uma seção inclinada do poço, onde  $W$  é a força peso do segmento e  $F_n$  a força normal de contato entre a coluna e o poço.

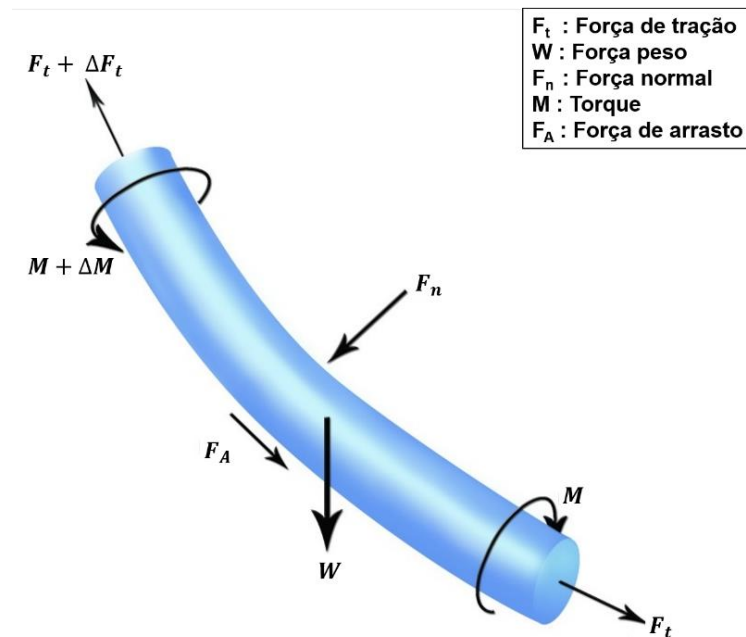


Figura 1.7 – Diagrama de forças da coluna de perfuração.  
Adaptado de Pagasus Vertex.

Valores excessivos de torque e arrasto são um dos principais problemas técnicos ocorridos durante a perfuração de poços direcionais (HO, 1988) e elevam consideravelmente o custo deste procedimento, podendo ocasionar as seguintes complicações: transmissão inadequada de peso e torque para a broca (SHEPPARD, 1987); incapacidade em deslizar a coluna durante a perfuração orientada (ASTON et al., 1998); aprisionamento da coluna (ASTON et al., 1998); e, comprometimento da tubulação devido à torção, fadiga, desgaste e flambagem (ASTON et al., 1998).

A presença do leito de cascalhos no poço é um dos principais fatores responsáveis por gerar tais adversidades (JOHANCSIK, 1983), e torna-se ainda mais preocupante durante uma manobra, procedimento que envolve a retirada e reinserção da coluna no poço. De acordo com RAE et al., (2005), o aumento do arrasto atrelado à presença do leito pode ser estimado pela elevação do fator de atrito (*sliding friction* fator – FFs), haja vista que o FFs é aproximadamente 40% menor quando a limpeza do poço

é realizada de forma adequada, ou seja, quando não há cascalhos acumulados. Além disso, a formação de um plugue de cascalhos (acúmulo de material rochoso que obstrui o espaço anular do poço), durante o deslocamento axial da coluna em direção a superfície, aumenta o arrasto e, em algumas situações, ocasiona o aprisionamento desta.

O surgimento do plugue pode ser entendido mediante a descrição do deslocamento da coluna ao longo do poço. Inicialmente a coluna encontra-se parcialmente imersa no leito de cascalhos e em repouso em relação a este, conforme ilustrado na Figura 1.8 a. Em seguida, o deslocamento da coluna provoca o escoamento de fluido de perfuração e cascalhos no sentido oposto. Então, os fragmentos de rocha se acumulam próximo aos elementos de maior diâmetro do BHA, geralmente a broca, elevando assim a altura do leito nesses locais, como mostrado na Figura 1.8 b. Por fim, quando os cascalhos atingem a parte superior do poço, configura-se a formação do plugue, conforme ilustrado na Figura 1.8 c.

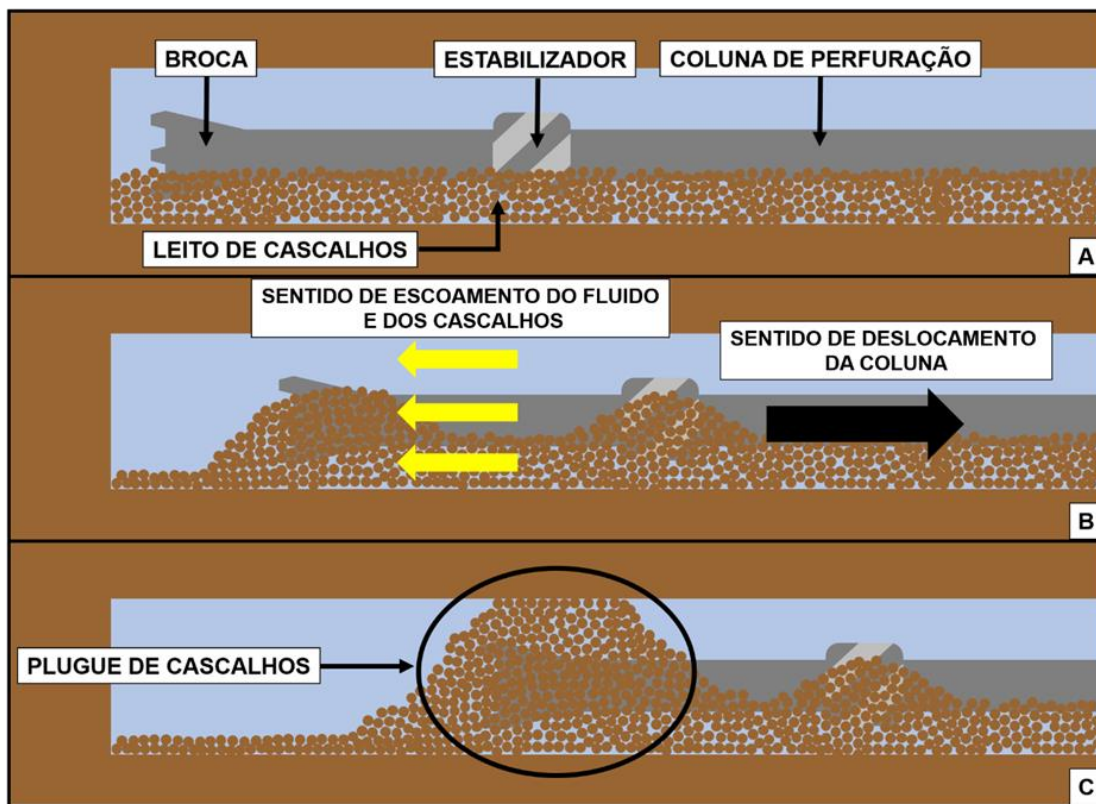


Figura 1.8 – Formação do plugue durante uma manobra: (a) posição inicial da coluna de perfuração; (b) escoamento de fluido e cascalhos durante o deslocamento da coluna de perfuração; (c) plugue formado. Autoria própria.

Para prevenir complicações causadas pela presença do leito de cascalhos, algumas técnicas citadas por MCCORMICK et al., (2011) podem ser utilizadas durante a perfuração de poços inclinados, dentre elas: a diminuição do coeficiente de atrito com as paredes do poço e o incremento das condições dinâmicas de operação por meio da rotação ou vibração da coluna. No entanto, mesmo com a utilização de técnicas de mitigação, nem sempre é possível reduzir o torque e arrasto a níveis aceitáveis.

#### **1.4. Objetivos gerais**

Considerando os conceitos expostos e discutidos, concluiu-se que a presença do leito de cascalhos ocasiona aumento do arrasto sobre a coluna de perfuração e pode provocar o aprisionamento desta em poços direcionais. Tendo isto em mente, o presente trabalho buscou compreender o fenômeno de interação entre a coluna e o leito durante a retirada desta do poço. Para tal, foram determinados os seguintes objetivos:

- i) Projetar e construir uma unidade experimental que reproduza características essenciais encontradas em um poço horizontal durante o deslocamento da coluna de perfuração;
- ii) Mensurar a força de tração aplicada sobre o modelo da coluna durante a movimentação;
- iii) Elaborar uma metodologia para a realização dos experimentos;
- iv) Avaliar a influência da altura do leito de cascalhos sobre a força de arrasto;
- v) Avaliar a influência da área transversal da broca sobre a força de arrasto;
- vi) Avaliar a influência da velocidade de translação da réplica da coluna de perfuração sobre a força de arrasto;

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta em ordem cronológica os trabalhos mais relevantes sobre o arrasto em colunas de perfuração em poços inclinados, dando enfoque à influência do leito de cascalhos sobre esta grandeza.

### 2.1. Modelagem do torque e arrasto

A modelagem do torque e arrasto sobre colunas de perfuração obteve maior destaque a partir do momento em que as perfurações direcionais se tornaram procedimentos usuais e viáveis economicamente. O equacionamento de tais grandezas visa determinar as forças atuantes na coluna de perfuração e/ou revestimentos durante as operações de perfuração, cimentação e completação. Os modelos existentes são alimentados com inúmeras informações, dentre elas, destacam-se: a trajetória do poço; as características reológicas do fluido de perfuração utilizado; a litologia da formação; o peso específico e o diâmetro das tubulações; o peso e o torque aplicados sobre a broca; e, a configuração do BHA. Em contrapartida, obtêm-se valores de tensão, torque e arrasto atuantes ao longo da coluna, além do fator de atrito médio entre esta e as paredes do poço.

O modelo desenvolvido por JOHANCSIK et al. (1984) foi o primeiro a ser publicado e, de acordo com os autores, permite planejar a trajetória de poços direcionais e selecionar adequadamente os componentes do BHA visando a redução do torque e do arrasto. No trabalho em questão, as seguintes premissas foram adotadas: o torque e o arrasto são gerados exclusivamente pela força de atrito proveniente do contato entre a coluna e as paredes do poço; as forças normais entre essas superfícies são geradas apenas por efeitos causados pela gravidade e pelas tensões que atuam nas curvaturas da trajetória do poço; o contato entre a coluna e a formação rochosa é considerado contínuo; a lubrificação e a interação entre os materiais envolvidos determinam o fator de atrito, que é obtido por meio de uma média das condições encontradas em toda a extensão do poço; a disposição geométrica da coluna é tida como sendo a mesma da trajetória do poço; e, a flexão da coluna não é considerada, uma vez que, de acordo com

os autores, este não é um fator de grande relevância para o cálculo das forças normais. Por este motivo o modelo em questão e os demais que não consideram a flexão da coluna são conhecidos como *soft-string*.

Fundamentados nestas hipóteses, os autores propuseram equações simples para o cálculo do torque e do arrasto obtidas por meio do balanço de forças em um segmento da coluna de perfuração, equações estas, que serviram como base para os demais trabalhos correlatos. Para calcular a força normal,  $F_n$ , foram considerados os efeitos da gravidade sobre a tubulação e as implicações da tensão presente nas seções curvadas do poço. O esquema ilustrado na Figura 2.1 evidencia os esforços que resultam na força normal, onde  $\alpha$  é o ângulo de inclinação da coluna,  $\theta$  o ângulo azimute e  $\mu$  o coeficiente de atrito entre as paredes do poço e a coluna de perfuração.

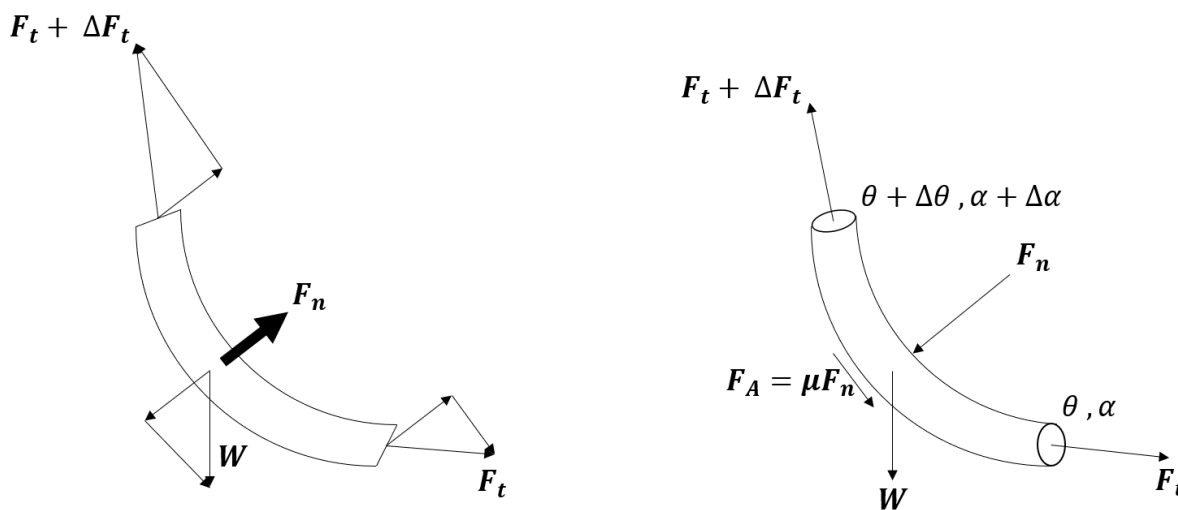


Figura 2.1 – Diagrama de forças sobre um segmento da coluna de perfuração.  
Autoria própria.

Desta forma, o balanço de forças realizado sobre o esquema da Figura 2.1 permite concluir que a força normal ( $F_n$ ) é igual ao vetor soma das componentes normais do peso,  $W$ , e das forças de tensão  $F_t$  e  $(F_t + \Delta F_t)$ , conforme indica a Equação 2.1. Assim, torna-se possível calcular os incrementos de tensão,  $\Delta F_t$ , e de torção,  $\Delta M$ , no segmento através das Equações 2.2 e 2.3, respectivamente. Tais cálculos são executados em toda a extensão da coluna e são iniciados no fundo do poço em direção à superfície, o que permite analisar a distribuição das forças e os pontos mais críticos, ou seja, os mais suscetíveis a falhas.



$$F_n = [(F_t \cdot \Delta\alpha \cdot \text{sen}\bar{\theta})^2 + (F_t \cdot \Delta\theta + W \cdot \text{sen}\bar{\theta})^2]^{1/2} \quad (2.1)$$

$$\Delta F_t = W \cdot \text{cos}\bar{\theta} + \mu \cdot F_n \quad (2.2)$$

$$\Delta M = \mu \cdot F_n \cdot r \quad (2.3)$$

Em estudo subsequente, SHEPPARD et al. (1987) propôs algumas melhorias ao modelo citado, dentre elas, destaca-se a consideração da influência da pressão do fluido de perfuração sobre a coluna. De acordo com os autores, incluir este termo significa evitar confusões em relação a localização dos pontos neutros (locais em que a tensão efetiva é igual a zero) ao longo da coluna e sobre a influência do empuxo nas regiões de curvatura da tubulação. No entanto, a maior contribuição deste trabalho foram as equações diferenciais, que provém das expressões apresentadas por JOHANCSIK et al. (1984). Tais contribuições conferiram ao modelo grande visibilidade, e o tornaram referência para trabalhos posteriores.

No mesmo ano, MAIDLA et al. (1987) avaliaram a diferença entre os valores calculados para o fator de atrito utilizando duas abordagens distintas, a bidimensional e a tridimensional. Tais cálculos foram realizados pelo modelo de torque e arrasto proposto pelos autores. Neste trabalho, o modelo de JOHANCSIK et al. (1984) é aperfeiçoado nos seguintes aspectos: o fator de atrito passa a ser calculado considerando a diferença entre as superfícies de contato de um poço aberto e de um revestido; e, o arrasto causado pelo fluido é incluído nos cálculos.

Posteriormente, CHILD et al. (1988) apresentaram um modelo capaz de incluir ondulações ao longo da trajetória, o que não era feito até então. A consideração de tais imperfeições tornou a geometria do poço mais condizente com a realidade, já que mesmo sob boas condições de perfuração o poço apresenta menor suavidade que a trajetória planejada. A determinação dos locais em que estas descontinuidades são inseridas é feita com base na experiência adquirida em poços vizinhos. Adicionalmente, o modelo permite utilizar, simultaneamente, até cinco tipos de fluidos de perfuração na simulação, além de possibilitar a determinação da profundidade das interfaces que separam tais fluidos. Por fim, a flexão da tubulação é contabilizada na modelagem, possibilitando assim, incluir o momento fletor nos cálculos das tensões. Modelos que contabilizam tal fator são conhecidos como *stiff string*. De forma geral, os autores

consideraram que a flexão tinha um pequeno impacto na previsão dos valores de torque e arrasto, no entanto, a rigidez da coluna se mostrava importante para poços rasos perfurados com largos tubos de perfuração ou com *doglegs* (trecho que apresenta mudança significativa da trajetória) acentuados.

Partindo do princípio de que os modelos existentes até então possuíam limitações, HO (1988) propôs algumas alterações, que segundo ele, aperfeiçoariam o cálculo do torque e do arrasto em poços inclinados. Tais modificações eram necessárias, pois os modelos *soft-string* ignoravam os efeitos causados pela rigidez da coluna, pela presença e localização dos estabilizadores e pela existência dos espaços vazios entre o poço e a coluna, o que culminava na subestimação dos valores de torque e arrasto calculados. Com a finalidade de superar tais limitações, HO (1988) propôs o *software* intitulado TORDRA-1SM, resultado da fusão do DIDRIL-1SM com o TORDRA-0SM. O primeiro é responsável pela análise da rigidez da coluna nos pontos onde este fator é mais acentuado, ou seja, nas conexões. Para esta análise, o *software* considera a localização dos estabilizadores no BHA e os espaços vazios existentes entre a coluna e as paredes do poço. Já o segundo, se encarrega da modelagem para o restante das tubulações de acordo com a abordagem *soft-string* tradicional. Ao final do trabalho, o autor constata, por meio de estudos de casos, que o carregamento sobre a coluna é sempre maior quando calculado com o TORDRA-1SM e que os modelos *soft-string* são adequados apenas para poços suaves, os quais não apresentam *buildup* superior a  $1,5^\circ/100'$ .

No ano seguinte, BRETT et al. (1989) desenvolveram um modelo *soft-string* muito semelhante ao proposto por SHEPPARD et al. (1987). Entretanto, algumas considerações adicionais foram adotadas, dentre elas, destacam-se: a utilização de múltiplos fatores de atrito, que permite caracterizar de forma mais adequada a litologia ao longo do poço; a movimentação axial e rotacional da coluna poderia ser considerada caso fosse necessário; e, a inclusão de equações de flambagem ao modelo, fenômeno este capaz de afetar sensivelmente os valores de torque e arrasto sobre a coluna. O resultado deste trabalho culminou em uma ferramenta computacional capaz de detectar em tempo real a instabilidade do poço, a presença de *keyseats* e limpeza inadequada dos cascalhos.

Dando continuidade ao progresso dos modelos, PASLAY (1994) utilizou a base consolidada do trabalho de SHEPPARD et al. (1987) e propôs algumas melhorias. O autor sugeriu que a diferença de pressão entre o espaço anular e o interior da coluna fosse contabilizada quando ocorresse escoamento axial de fluido nestas regiões. Com este intuito, a tensão de cisalhamento advinda deste escoamento foi considerada no equacionamento do torque e arrasto. Adicionalmente, equações de flambagem helicoidal das tubulações foram incluídas ao modelo, já que, tal fenômeno é responsável por alterar as forças de contato entre a coluna e as paredes do poço e causar flexão, alterando assim os valores de torque, do arrasto e do fator de atrito.

Adiante, AADNOY et al. (1998) apresentou equações analíticas para a determinação do torque e arrasto baseado nas tensões. Tais expressões matemáticas possuem abordagem tridimensional e são capazes de analisar as grandezas mencionadas anteriormente durante a movimentação axial e/ou rotacional da coluna. Os autores consideraram os conceitos referentes ao modelo *soft-string*, pois acreditavam que os efeitos da rigidez da coluna eram irrelevantes para o equacionamento das tensões. Ao final deste estudo, AADNOY et al. (1998) julgaram necessário distinguir o atrito causado pelo contato da coluna com o fluido, com os cascalhos e com as paredes do poço em trabalhos futuros.

Em seguida, GAYNOR et al. (2002) analisa em seu trabalho a influência das micro tortuosidades nas paredes do poço sobre o fator de atrito e, conseqüentemente, sobre o torque e arrasto. Tendo isto em vista, os autores analisaram dados de torque e arrasto de aproximadamente cem poços do Mar do Norte, dentre estes, vinte perfurados com um sistema que reduz comprovadamente as imperfeições ao longo do poço. Então, tornou-se possível comparar os dados e analisar a sensibilidade do torque e arrasto em relação a presença de micro tortuosidades, que de acordo com os autores, são provenientes do formato espiralado que o poço assume durante a perfuração. Ao final do estudo, GAYNOR et al. (2002) constatou que a ausência de tais imperfeições reduz significativamente os valores do fator de atrito.

Passados alguns anos, MITCHELL (2008) propôs uma nova maneira de calcular a trajetória real do poço durante a perfuração utilizando os dados coletados com a coluna. Tal mudança visava corrigir um problema gerado pelo modelo da mínima curvatura, que

até o momento era o mais utilizado. Esta abordagem fornecia uma trajetória formada por arcos circulares de raios distintos e inclinação constante. No entanto, valores elevados de flexão eram notados, fato que não condizia com a trajetória calculada. Assim sendo, a flexão era ignorada nos cálculos juntamente com algumas parcelas da força de contato, o que resultava em cálculos equivocados de torque e do arrasto sobre a coluna. Para corrigir tal cenário, uma nova abordagem (*spline model*) foi utilizada, e, em estudos de caso, se mostrou mais eficiente para poços perfurados com altas taxas de variação de inclinação por unidade de comprimento.

No mesmo ano, AADNOY (2008) sugeriu um modelo generalizado para calcular o torque e o arrasto baseado em apenas duas equações. Isto foi possível mediante análise de estudos anteriores que apresentavam soluções simétricas entre si, o que possibilitou a criação de um modelo válido para inúmeras geometrias. Adicionalmente, o autor contabilizou a compressão e tração sobre a coluna na modelagem proposta.

Por fim, VADIM et al. (2013) apresentaram um modelo dinâmico 3-D para o torque e o arrasto capaz de simular a movimentação axial e rotacional da coluna em regime permanente. Neste estudo, os autores compararam seus resultados com os obtidos por modelos estáticos, onde dois utilizavam a abordagem *soft-string* e os restantes *stiff string*. A modelagem em questão considerou os seguintes aspectos: flexão e torção da coluna; existência de espaços vazios entre as tubulações e o poço; pontos de contato entre as paredes do poço e a coluna; deformação elástica da formação; vibrações laterais, axiais e torcionais; e, o movimento da coluna (rotação e translação). Ao concluir o estudo, VADIM et al. (2013) constataram que os valores de torque, do arrasto e do fator de atrito comparados, eram praticamente os mesmos calculados com modelos estáticos e que a grande diferença consistia na magnitude e localização das forças de contato. O que impactava de forma significativa na tensão local, fator este, considerado importante na prevenção de fadiga e falhas ao longo da coluna de perfuração.

Tendo em vista os modelos de torque e arrasto comentados, averiguou-se que estes consideram os seguintes parâmetros:

- i) trajetória do poço;
- ii) forças normais;
- iii) peso específicos das tubulações;

- iv) diâmetro das tubulações e conexões;
- v) empuxo sobre a coluna de perfuração;
- vi) pressão exercida pelo fluido sobre as tubulações;
- vii) tipo da superfície de contato (poço aberto ou revestido);
- viii) litologia da formação;
- ix) tortuosidades ao longo do poço;
- x) flexão e torção da coluna;
- xi) presença de espaços vazios entre a coluna e a formação;
- xii) localização dos estabilizadores ao longo da coluna;
- xiii) movimentação axial e rotacional da coluna;
- xiv) flambagem da tubulação;
- xv) diferenças de pressão entre o interior da coluna e o espaço anular;
- xvi) tensões de cisalhamento provenientes do escoamento no espaço anular e dentro da coluna;
- xvii) método de cálculo da trajetória do poço;
- xviii) vibrações laterais, axiais e torcionais;
- xix) peso e torque aplicados sobre a broca;

## **2.2. Arrasto em colunas de perfuração: estudos experimentais**

O levantamento bibliográfico realizado na seção anterior revela que a modelagem do torque e do arrasto em colunas de perfuração negligencia a existência do leito de cascalhos. Tal fato também ocorre em relação aos estudos experimentais sobre o tema. No entanto, o trabalho realizado por RASI (1994) apresenta características e conclusões interessantes, que direcionaram esta pesquisa. Em seu estudo, o autor propõe a criação de um modelo capaz de prever o aprisionamento da coluna durante uma manobra, quando esta encontra-se parcialmente imersa em um leito de cascalhos.

Tendo este objetivo em mente, RASI (1994) realizou experimentos com o intuito de determinar a mínima altura de leito capaz de aprisionar a coluna durante o deslocamento. Tal parâmetro recebeu o nome de altura crítica,  $H_{crit}$ . Esses testes consistiam na movimentação de modelos da coluna de perfuração ao longo de

tubulações transparentes preenchidas com fluido e, parcialmente, com cascalhos. Para tal, aplicava-se uma força de tração na coluna.

O aparato experimental desenvolvido possibilitava a variação dos seguintes parâmetros: diâmetro da tubulação; área transversal e geometria da broca; diâmetro e comprimento dos colares de perfuração; altura do leito de cascalhos; tipo de cascalho; e, inclinação do poço. Dessa forma, tornou-se possível relacionar a força de tração aplicada sobre a coluna com as variáveis mencionadas anteriormente.

Durante a realização dos experimentos, duas situações foram observadas: na primeira, à medida em que a coluna se deslocava, notava-se a formação de um acúmulo de cascalhos próximo ao elemento de maior diâmetro do BHA, normalmente a broca. Passados alguns instantes, o volume acumulado atingia altura constante e estabelecia-se o regime permanente, ou seja, o acúmulo de cascalhos mantinha o volume constante e a força de tração exercida sobre a broca também; na segunda, o acúmulo de cascalhos continuava ganhando volume até ocupar por completo a seção transversal do poço, momento no qual, constituía-se o plugue. Tal ocorrência apresentou maiores complicações, pois após a formação do plugue, este aumentava sua extensão à medida em que a coluna se deslocava, gerando assim incrementos na força de tração e, em alguns casos, o aprisionamento do conjunto.

Após a análise dos resultados experimentais, RASI (1994) constatou que a área transversal livre do poço (região sem cascalhos),  $A_L$ , e a área transversal da broca,  $A_{TB}$ , possuem grande relevância sobre o problema tratado. Para a maioria dos casos, quando  $A_{TB} > A_L$  notou-se a formação do plugue e, conseqüentemente, o aumento da força de tração necessária para movimentar a coluna. No entanto, quando  $A_{TB} < A_L$  isto não ocorreu. Adicionalmente, o autor constatou que a força de tração aumenta exponencialmente quando a razão  $A_{TB}/A_L$  se aproxima de 1, independentemente da configuração do BHA. Dessa forma, RASI (1994) concluiu que a área transversal da broca influencia de forma significativa  $H_{crit}$ .

Além disso, RASI (1994) analisou a influência dos seguintes parâmetros sobre  $H_{crit}$ : diâmetro da coluna; geometria da broca; diâmetro e comprimento das conexões; tipo de cascalho; e, inclinação do poço. Porém, nenhum deles apresentou grande relevância como a área transversal da broca.

Ao final de seu estudo, RASI (1994) criou um parâmetro, o *hole cleaning ratio* (HCR), com a finalidade de relacioná-lo com a ocorrência do aprisionamento da coluna devido à formação do plugue de cascalhos durante uma manobra. Dessa forma, HCR é definido pela razão entre a altura real do leito de cascalhos no poço e  $H_{crit}$ . Assim sendo, o autor aplicou seu modelo em cinquenta poços perfurados no Mar do Norte e constatou que: para  $HCR > 1,1$  não ocorreram aprisionamentos; e, que para  $HCR < 0,5$  tal fato ocorreu em todos os casos. Dessa forma, concluiu-se que a probabilidade de ocorrer o aprisionamento da coluna aumenta com a redução de HCR.

Mediante a comprovação da eficácia da utilização de HCR para prever o aprisionamento da coluna de perfuração, o autor recomenda a manipulação das variáveis intrínsecas ao problema para atingir valores de HCR superiores a 1,1. Ademais, RASI (1994) propôs as seguintes práticas para evitar a formação do plugue:

- i) Utilizar brocas e estabilizadores com a menor área transversal possível;
- ii) Usar uma coluna com o menor diâmetro externo possível;
- iii) Empregar fluidos de perfuração com alta ou baixa viscosidade para fornecer elevada área transversal livre do poço;
- iv) Se possível, impor maiores vazões, pois estas aumentam HCR;
- v) Equipar a coluna com elementos de diâmetro reduzido, principalmente, próximo à broca;

### **2.3. Síntese do capítulo**

Mediante análise da revisão bibliográfica, constata-se que alguns fatores responsáveis por elevar o arrasto sobre a coluna de perfuração não são considerados de maneira individualizada pelos modelos existentes. Tais fatores são integralizados no coeficiente de atrito, ou seja, não se sabe a real contribuição destes para o incremento do arrasto. Esta abordagem é adotada para o leito de cascalhos, e pode representar cálculos subestimados da força de arrasto, uma vez que o incremento desta grandeza causado pela formação do plugue de cascalhos não é considerado. O que torna o aprisionamento da coluna imprevisível.

Adicionalmente, nota-se que a análise experimental do tema discutido necessita ser ampliada, uma vez que apenas um trabalho correlato foi encontrado. Porém, o estudo realizado por RASI (1994) foi de grande valia para determinar os parâmetros mais influentes sobre o aumento da força de arrasto e, conseqüentemente, sobre o aprisionamento da coluna. Desta forma, torna-se possível traçar objetivos específicos para a pesquisa.

#### **2.4. Objetivos específicos**

Os objetivos específicos foram determinados visando preencher algumas lacunas deixadas por RASI (1994) em seu artigo. Tendo isto em mente, o presente trabalho propõe a análise da força de arrasto mediante a variação da área transversal da broca e da área transversal livre do poço, sendo estes os parâmetros mais relevantes para prever o aprisionamento da coluna, segundo RASI (1994). Dessa forma, pretende-se comprovar que a força de arrasto aumenta exponencialmente quando a razão  $A_{TB}/A_L$  se aproxima de 1. Além destes parâmetros, o presente trabalho pretende analisar a velocidade de translação da coluna.



### 3. DESCRIÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL

O presente capítulo descreve a unidade experimental utilizada nos ensaios realizados, identificando cada um dos componentes que a constituem. Em seguida, apresenta o detalhamento dos sistemas que compõem o aparato experimental. Por fim, a metodologia desenvolvida para a realização dos experimentos.

#### 3.1. Descrição geral da unidade experimental

O aparato experimental foi projetado com o objetivo de avaliar experimentalmente a força de arrasto sobre uma coluna de perfuração parcialmente imersa em leito de cascalhos horizontal durante uma manobra. O projeto foi concebido para reproduzir as condições de escoamento de um poço horizontal e possibilitar: a visualização da interação entre a coluna, o fluido e os cascalhos durante os testes efetuados na unidade experimental; a formação de um leito de altura constante; a medição da força de tração aplicada sobre a coluna durante o deslocamento; e, o controle da velocidade de rotação e translação da coluna.

Os elementos principais da unidade experimental são a tubulação de acrílico, a coluna de alumínio e uma peça usinada em polipropileno (PP), que representam, respectivamente, as paredes do poço, a coluna de perfuração e a broca. A organização destes elementos foi projetada com o intuito de permitir o deslocamento da coluna de alumínio, dentro da tubulação de acrílico, do ponto X ao ponto Y, conforme indicado nas Figura 3.1 a e b.

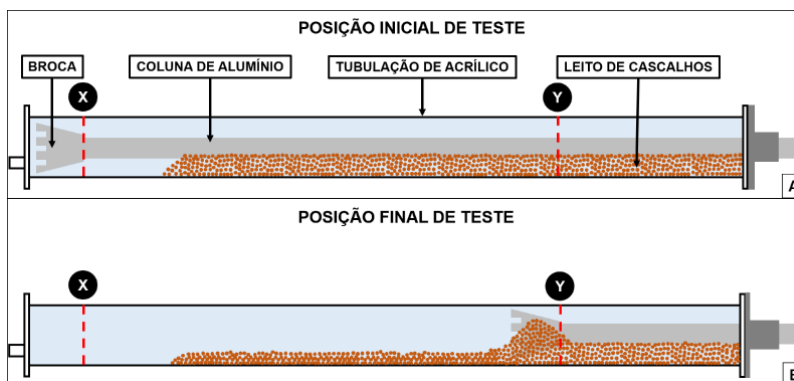


Figura 3.1 – Disposição dos elementos principais da unidade experimental: (a) posição inicial de teste; (b) posição final de teste. Autoria própria.

Os demais componentes da unidade experimental estão indicados na Figura 3.2, são eles: dois pares de guias lineares; um par de cremalheiras; um servo motor, responsável pela translação da coluna; um motor, que permite a rotação da broca; uma célula de carga, destinada à mensurar a força de tração aplicada sobre a coluna; e, uma estrutura de alumínio que conecta e suporta os elementos citados anteriormente. Além destes, têm-se: dois flanges em aço inox; um tanque para armazenamento do fluido de trabalho; duas válvulas de controle; uma bomba pneumática; uma tubulação de policloreto de polivinila (PVC); dois mancais de sustentação; três sapatas que sustentam a tubulação de acrílico; um computador; e, dois painéis elétricos.

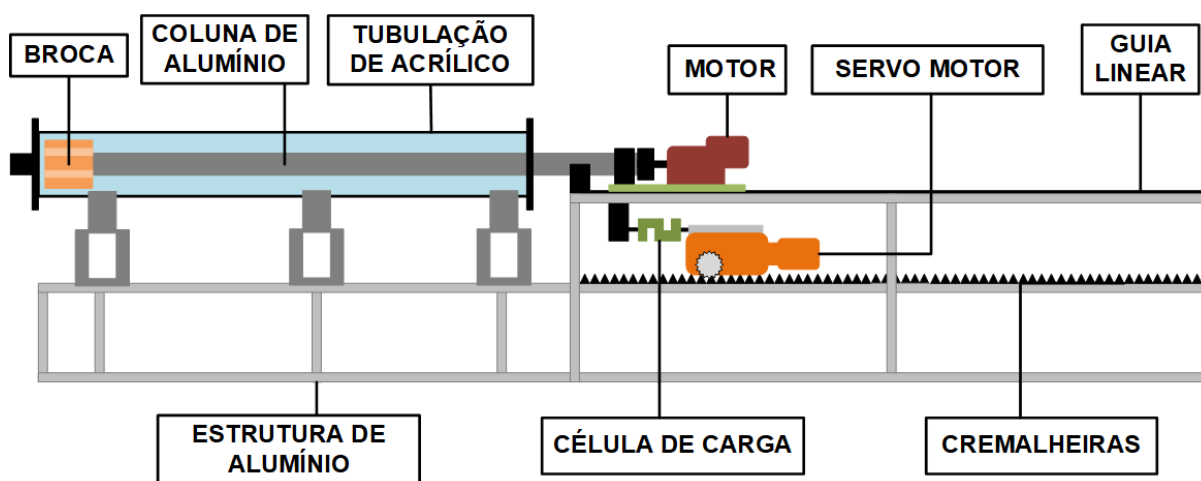


Figura 3.2 – Esquema da unidade experimental. Autoria própria.

### 3.2. Detalhamento dos componentes

Para facilitar a compreensão, o aparato experimental foi dividido em sistemas de funções distintas: o sistema estrutural, encarregado de manter a estrutura física e o posicionamento dos componentes; o sistema hidráulico, responsável pelo armazenamento e escoamento do fluido de trabalho; o sistema de movimentação, incumbido de proporcionar translação e rotação à coluna; e, o sistema de aquisição de dados e controle, que permite a manipulação das variáveis durante os testes, bem como a aquisição do sinal da força de tração medida.

### 3.2.1. Sistema estrutural

A estrutura de sustentação, indicada na Figura 3.3, é constituída por perfis de alumínio, fabricados pela Eng. Legho Systems, modelo básico, com perfis de seção transversal de 50 mm x 50 mm e 50 mm x 100 mm. A escolha do material se deu pelo baixo peso específico do alumínio (2697 kg/m<sup>3</sup>) e pela praticidade de transporte e montagem. A estrutura está apoiada sobre um conjunto de sapatas reguláveis, que permitem o nivelamento do aparato experimental.

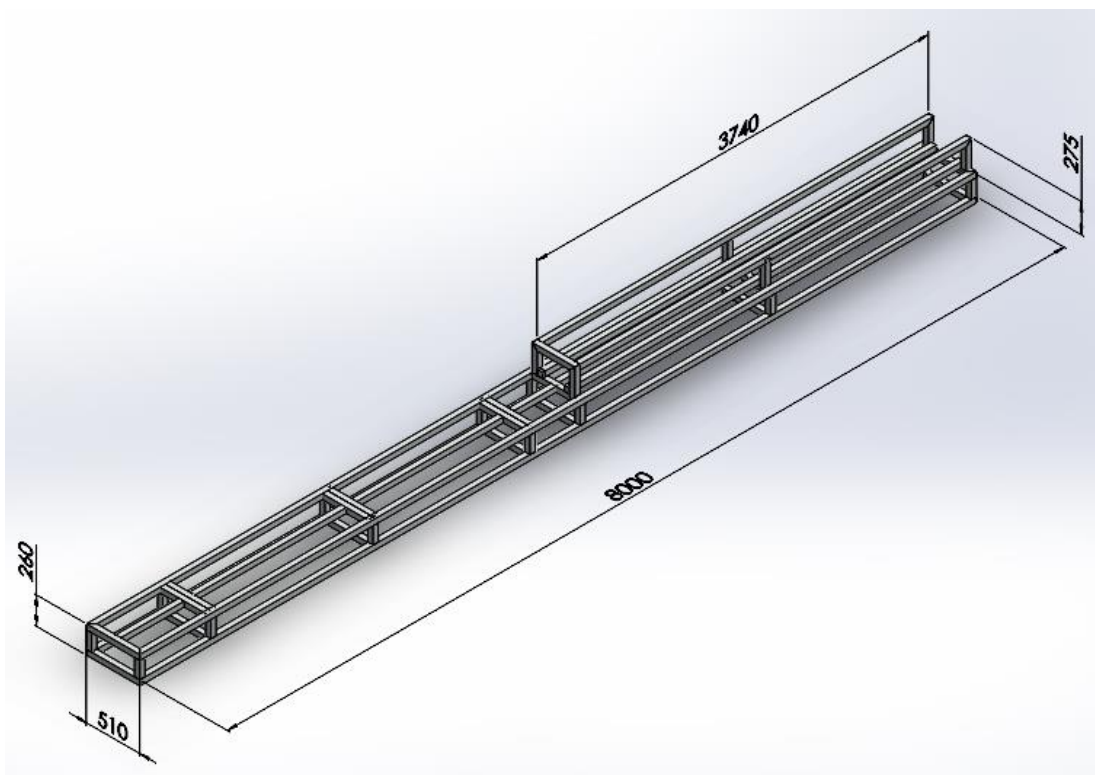


Figura 3.3 – Dimensões principais da estrutura de alumínio do aparato experimental. Autoria própria.

Os perfis utilizados possibilitam o acoplamento dos demais componentes do sistema estrutural de maneira simples e rápida. As sapatas de sustentação, fabricadas por Gradetec, confeccionadas em aço carbono ASTM A-36, são responsáveis por suportar o peso das tubulações de acrílico e, estão fixadas nos perfis de 50 mm x 100 mm, conforme indicado na Figura 3.4 a. Sobre cada sapata, encontra-se: uma placa de aço carbono, de dimensões 29,8 cm x 43,4 cm x 1 cm, e os suportes das tubulações de acrílico, usinados em *nylon*. Por fim, tem-se uma placa de aço carbono instalada sobre

duas guias lineares, conforme indicado na Figura 3.4 b. Sobre esta, estão acoplados o motor e o mancal de aço. Já o mancal de *nylon*, está instalado no perfil de alumínio próximo ao flange, de acordo com a Figura 3.4 b.

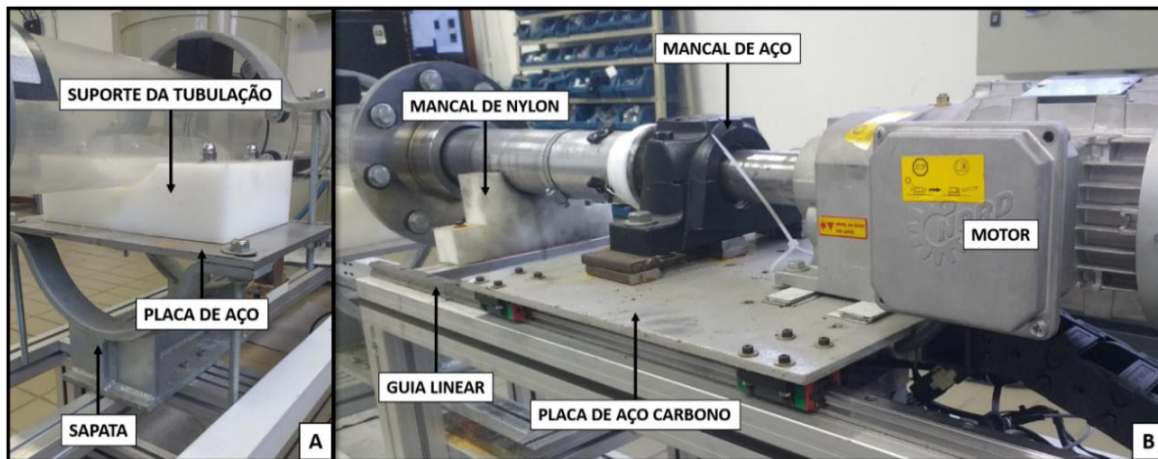


Figura 3.4 – Disposição dos elementos estruturais: (a) suporte da tubulação, placa de aço e sapata; (b) mancais, guia linear e placa de aço. Autoria própria.

### 3.2.2. Sistema hidráulico

O sistema hidráulico é constituído por uma bomba pneumática, por duas tubulações de acrílico, por 2 flanges, por tubos e conexões de PVC, por um filtro, por duas válvulas manuais e por um reservatório.

A bomba pneumática, da marca GRABE, modelo GRP 50, possui uma carcaça feita em PP e diafragmas do tipo ST. Este equipamento suporta uma pressão máxima de 100 psi, trabalha com a vazão máxima de 570 l/min, consome até 4,9 m<sup>3</sup>/min de ar e admite o bombeio de fluidos com partículas de até 5 mm. A escolha desta bomba, se deu pela sua capacidade de sucção, por não se danificar em operações a seco e pela fácil instalação.

A tubulação de acrílico possui diâmetro externo de 150 mm e diâmetro interno de 140 mm, com comprimento de 4 m. O volume de armazenamento totaliza 61,6 l. Nas extremidades da tubulação existem dois flanges de aço inox, o primeiro, indicado na Figura 3.5 a, permite o escoamento de fluido advindo do tanque, o segundo, possui um sistema de vedação composto por uma gaxeta e um raspador, pelo qual passa a coluna de alumínio, conforme ilustrado na Figura 3.5 b.

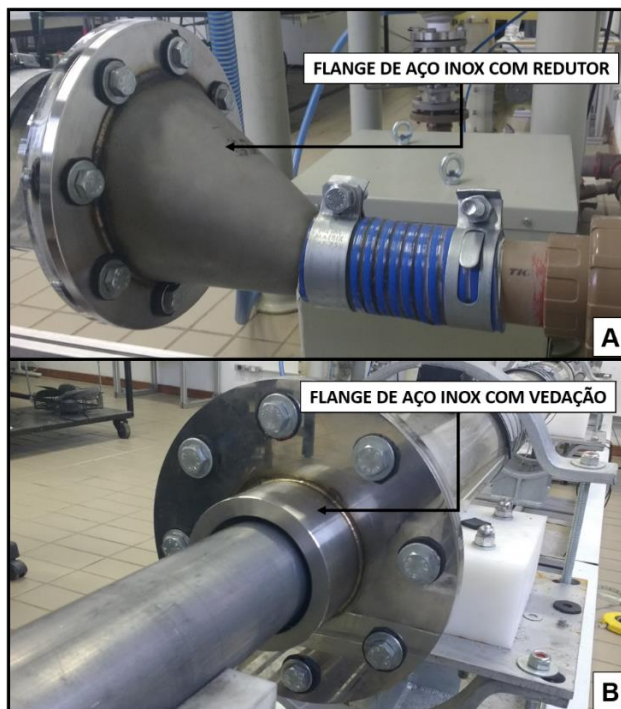


Figura 3.5 – Elementos do sistema hidráulico: (a) flange de aço inox com redutor; (b) flange de aço inox com vedação. Autoria própria.

A tubulação de acrílico foi cortada a laser com o intuito de criar 4 aberturas, de dimensões 24 cm x 12 cm cada, conforme ilustrado na Figura 3.6. Com isso, tornou-se viável a inserção dos cascalhos, o nivelamento do leito e o acoplamento da broca à coluna. Tais aberturas são fechadas com o auxílio de 4 tampas de aço carbono e um conjunto de 24 abraçadeiras.

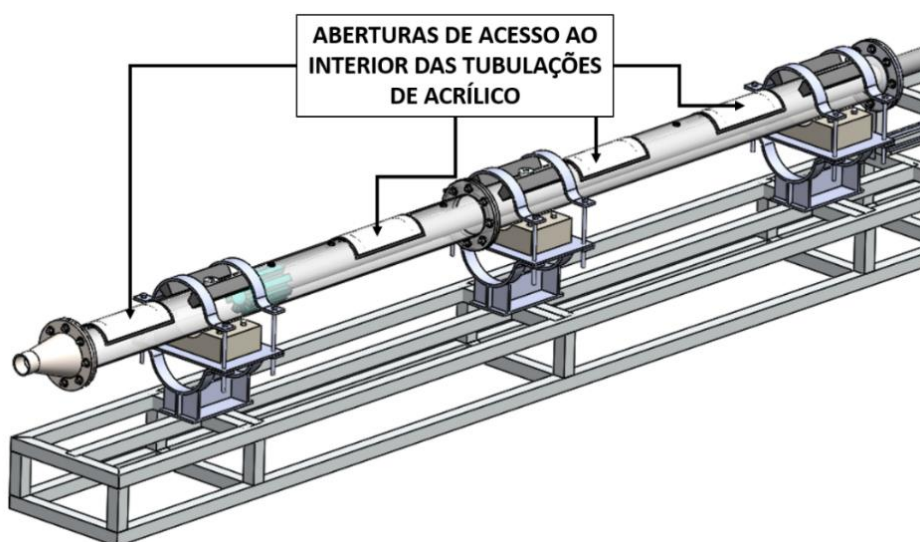


Figura 3.6 – Aberturas (escotilhas) de acesso ao interior da tubulação de acrílico. Autoria própria.

Os tubos e as conexões de 2", da marca Tigre, fabricados em PVC, foram instalados no aparato experimental com o objetivo de interligar o tanque, a tubulação de acrílico e a bomba, conforme indicado na Figura 3.7. Para controlar a vazão do reservatório de fundo cônico, da marca Union Equipamentos, com capacidade de 542 l, para os tubos de acrílico, utiliza-se uma válvula manual do tipo esfera, com corpo fabricado em aço ASTM A351 - CF8, da marca MGA. Ademais, uma válvula do tipo esfera, da marca Tigre, permite a drenagem das tubulações de acrílico por meio da atuação da bomba pneumática, modelo GRP 50, da marca GRABE, que está conectada a tubulação principal, por meio de uma tubulação de retorno de 3/4", onde encontra-se um filtro.

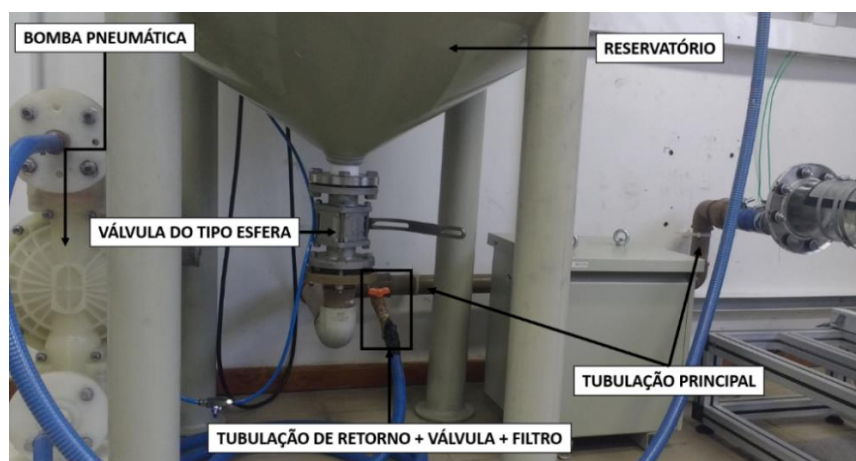


Figura 3.7 – Disposição do tanque, da bomba pneumática, das válvulas e da tubulação de PVC. Autoria própria.

### 3.2.3. Sistema de movimentação

O sistema de movimentação é composto por dois subsistemas, o de rotação e o de translação. O primeiro é responsável por rotacionar a coluna, sendo composto por um motor, um eixo e um rolamento. Já o segundo, tem por objetivo movimentar a coluna no sentido axial dentro da tubulação de acrílico, possuindo os seguintes elementos: um servo motor, um eixo, duas engrenagens, um par de cremalheiras e dois pares de guias lineares.

O subsistema de rotação se conecta à coluna de alumínio através de um eixo usinado em aço carbono, de acordo com a Figura 3.8 a. Na extremidade oposta à coluna, encontra-se o motor, da marca Nord, modelo SK 172.1-80S/4, com 0,75 hp de potência,

podendo atingir até 172 rpm. Entre eles, tem-se um rolamento cônico SKF acoplado ao eixo. Na Figura 3.8 b, está indicado o subsistema de translação, que está conectado à coluna de forma indireta. O servo motor, da marca HIWIN, de 750 W de potência, com torque máximo de 7,2 N.m, está ligado a um redutor, da marca TRANSTECNO. Este equipamento está fixado em duas guias lineares, que fornecem estabilidade durante seu deslocamento, e apoiado sobre duas cremalheiras através de duas engrenagens, conforme mostrado na Figura 3.8 b. O torque aplicado sobre tais engrenagens proporciona o deslocamento do redutor, que por sua vez traciona a célula de carga, que conectada a placa suporte, conforme apontado na Figura 3.8 c, movimenta a coluna de alumínio.

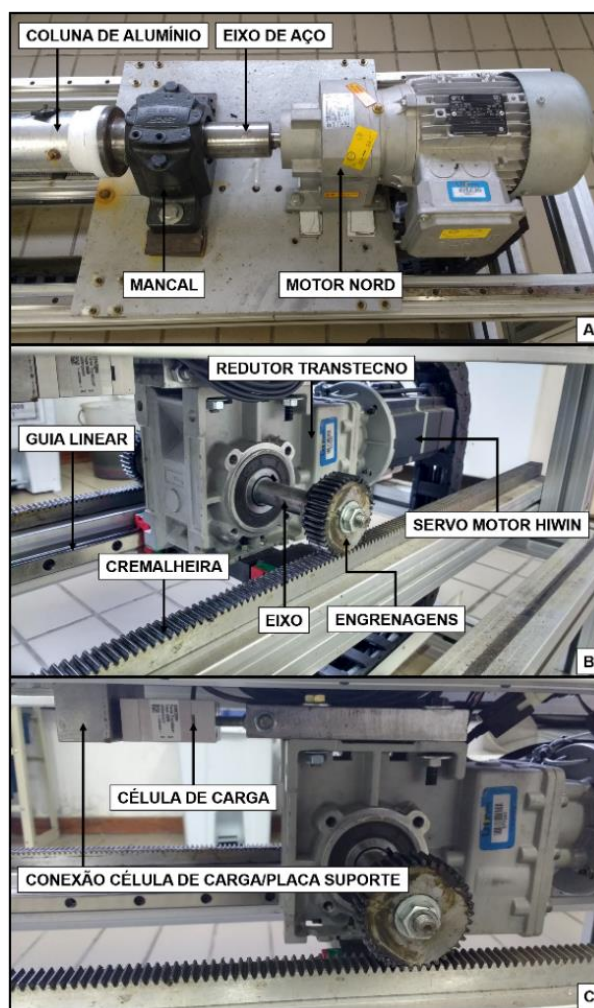


Figura 3.8 – Disposição dos elementos do sistema de movimentação: (a) subsistema de rotação: motor; (b) subsistema de translação: servo motor, redutor, eixo e engrenagens; (c) conexões entre o redutor, a célula de carga e a placa suporte.

Autoria própria.

### 3.2.4. Sistema de controle e medição

O sistema de controle e medição tem a finalidade de medir e controlar as variáveis de interesse, sendo composto por uma célula de carga, por placas de aquisição de dados, controladores e um computador. A célula de carga do tipo S, fabricada pela HBM, modelo S2M, com classe de precisão 0,02 e capacidade nominal de 500 N é responsável por medir a força de tração aplicada à coluna durante a realização dos experimentos. Ela encontra-se fixada a um bloco de aço carbono, por meio de um parafuso, e ao redutor, com o auxílio de um olhal, conforme indicado na Figura 3.9. Quando o redutor se desloca, ele aplica uma tração sobre a célula de carga, que por sua vez, transmite esta força ao bloco de aço, mostrado na Figura 3.9. Então, o bloco de aço promove o deslocamento da placa suporte e, conseqüentemente, da coluna de alumínio.

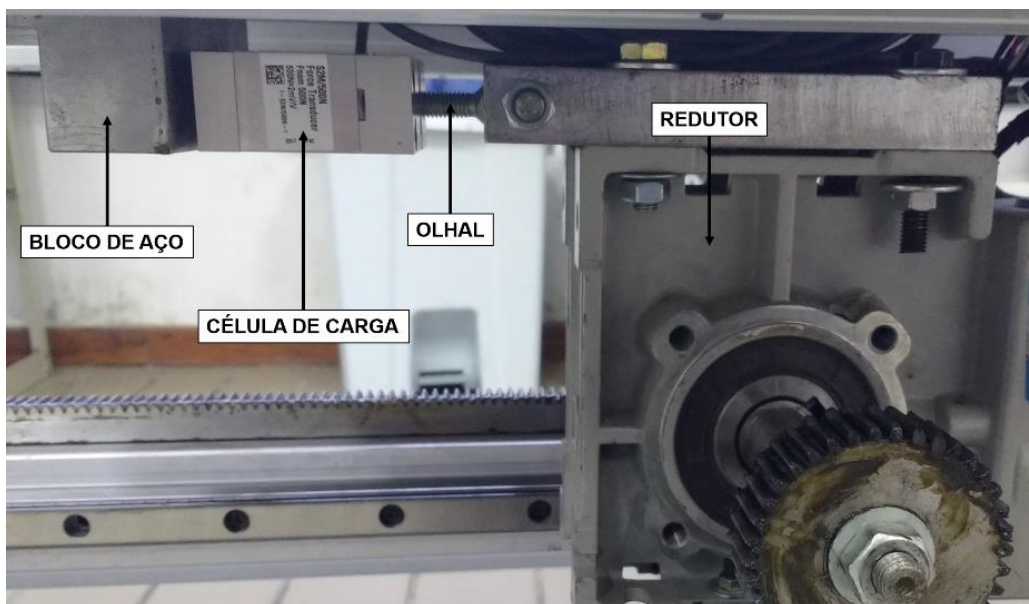


Figura 3.9 – Fixação da célula de carga ao redutor e ao bloco de aço através do olhal e de um parafuso, respectivamente. Autoria própria.

Os sinais analógicos de tração são coletados por um sistema de aquisição de dados da National Instruments, convertidos em sinais digitais e enviados a um computador por meio de um cabo ethernet. O sistema de aquisição de dados utiliza um Chassi NI cDAQ 9188 e três placas, conforme indicado na Figura 3.10 a. A placa NI 9237 é responsável por coletar os sinais provenientes da célula de carga, a placa NI 9263, é utilizada para fornecer tensão ao motor, já a NI 9474, tem a finalidade de controlar o servo e o motor.



No segundo painel, têm-se dois inversores e uma fonte de 24 V, conforme ilustrado na Figura 3.10 b. O controle dos equipamentos e o monitoramento das variáveis são realizados através do software *LabVIEW*, da National Instruments, e do *Lightening*, da HIWIN.

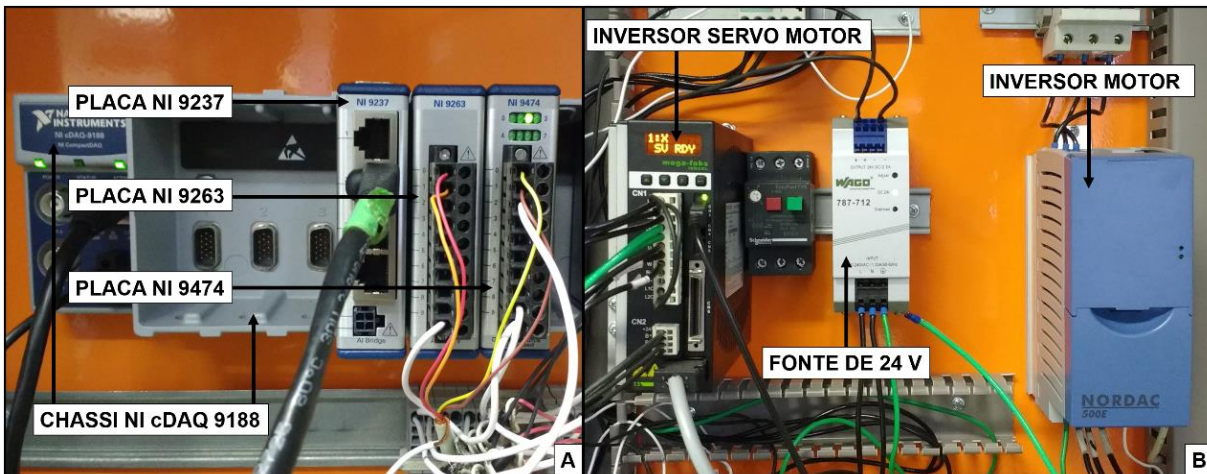


Figura 3.10 – Elementos do sistema de controle e medição: (a) chassi e placas de aquisição de sinais; (b) inversores e fonte de 24 V. Autoria própria.

### 3.3. Funcionamento da unidade experimental

Para iniciar o funcionamento do aparato experimental, deve-se primeiramente energizar os equipamentos através da chave geral, localizada no painel elétrico. Feito isto, inicia-se o computador e o programa de controle da Unidade Experimental de Arrasto no *LabVIEW*. Este por sua vez, realiza os seguintes comandos de controle:

- i) Liga e desliga o servo motor e o motor;
- ii) Controla o sentido e velocidade de rotação do motor;
- iii) Grava os dados de tração medidos pela célula de carga;
- iv) Permite determinar a tração máxima suportada pela célula de carga.

A interface do usuário apresenta os botões responsáveis por executar as ações descritas e um gráfico que mostra a tração em função do tempo, atualizada em tempo real enquanto o programa estiver funcionando, o que pode ser visualizado na Figura 3.11.

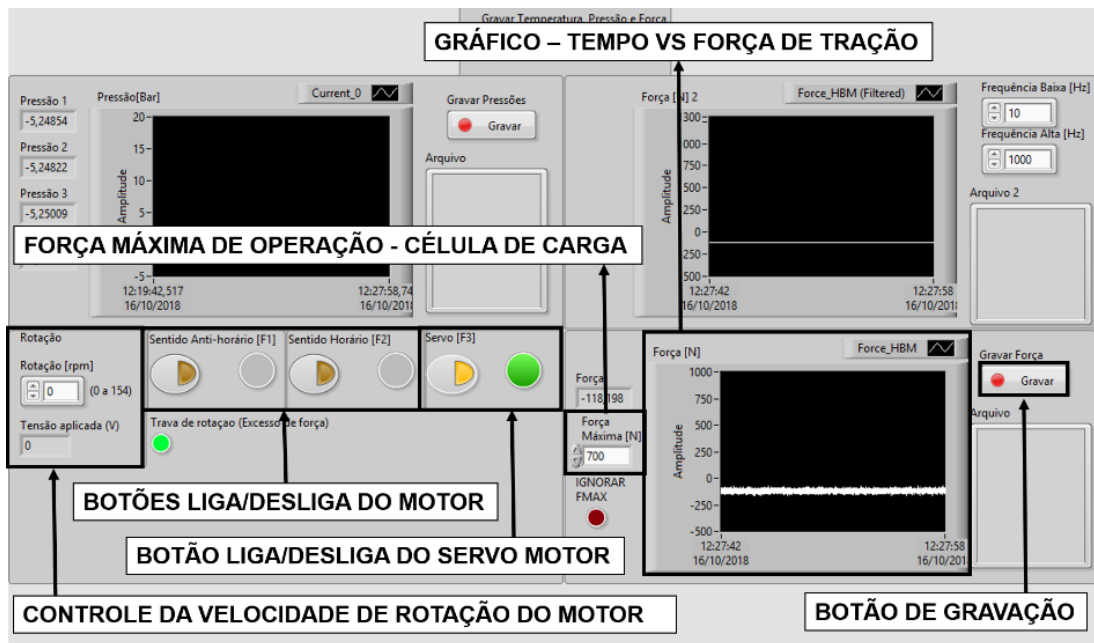


Figura 3.11 – Interface LabVIEW. Autoria própria.

Para controlar o funcionamento do servo motor, utiliza-se o *software Lightning*, que deve ser iniciado após o acionamento deste equipamento no *LabVIEW*. Na interface I, mostrada na Figura 3.12 a, o usuário é capaz de selecionar a unidade de comprimento que deseja utilizar durante a manipulação do equipamento. Feito isso, torna-se possível, por meio da interface II (Performance Center), indicada na Figura 3.12 b, escolher os seguintes parâmetros: a posição inicial e final de deslocamento da coluna; e, a velocidade e aceleração desenvolvidas durante o deslocamento do servo. Vale ressaltar, que o controle da bomba é realizado manualmente.

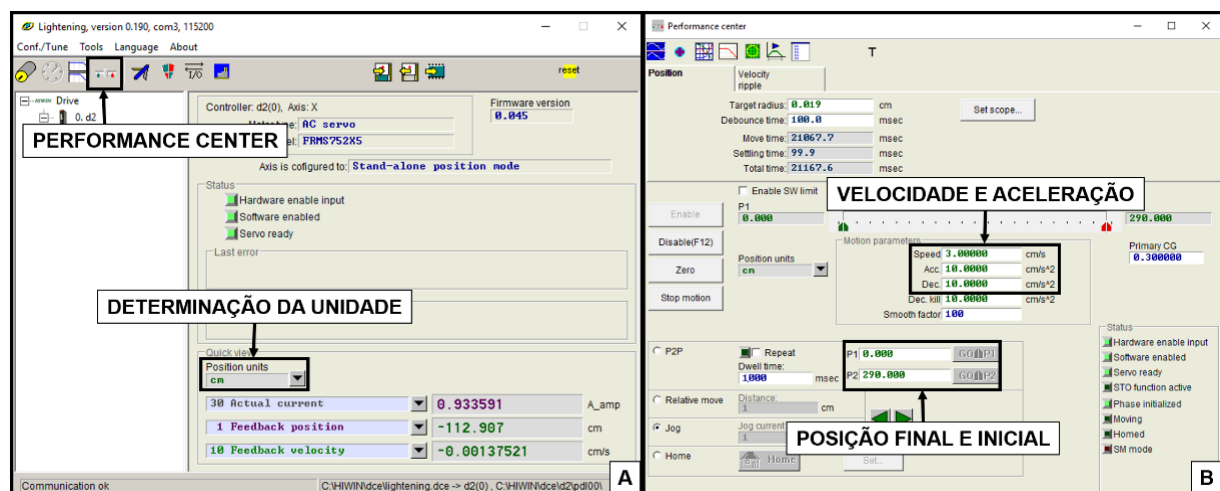


Figura 3.12 – Interfaces do lightning: (a) interface I; (b) interface II. Autoria própria.

### **3.4. Verificação do aparato experimental**

Com o intuito de atestar a confiabilidade dos resultados obtidos nos testes executados ao longo do estudo, foi realizada a verificação do aparato experimental. Para concluir esta etapa, os seguintes procedimentos de verificação foram realizados:

- i) verificação de calibração da célula de carga;
- ii) verificação da célula de carga acoplada à unidade experimental.

#### **3.4.1. Verificação de calibração da célula de carga**

O objetivo desta etapa é comparar os valores de tração registrados pela célula de carga quando esta é submetida a cargas conhecidas, de modo a verificar se o equipamento está calibrado corretamente. Para tal, a célula de carga foi fixada em uma superfície estática por uma de suas extremidades, na outra, foi acoplado um olhal, onde foi pendurada uma carga de 2689 g. Esta ficou erguida por determinado período de tempo, para que fosse possível analisar a leitura do equipamento e suas flutuações. Por fim, a tração registrada pela célula a uma taxa de 2000 aquisições por segundo apresentou desvio padrão ( $\sigma$ ) igual a 0,0762 e incerteza relativa de 0,0102 %. Os cálculos realizados estão indicados na Seção A.1 do Apêndice A e os resultados estão contidos na Tabela A.1.

#### **3.4.2. Verificação da célula de carga acoplada à unidade experimental**

Esta etapa tem a finalidade de verificar a qualidade dos dados registrados pela célula de carga durante o funcionamento da unidade experimental, ou seja, quando o sistema de movimentação está operando. Com este intuito, foram realizados testes de deslocamento de cargas, que consistiam em içar cargas de massa conhecida através da movimentação da parte móvel do aparato experimental. Para isto, a extremidade de um cabo de aço delgado foi fixada ao eixo que conecta o motor e a coluna. Então, uma carga foi pendurada na outra extremidade com o auxílio de um sistema de polias, conforme ilustrado na Figura 3.13. Dessa forma, as cargas foram içadas com velocidade constante

por 2 metros. Nestes testes, foram utilizadas cargas de 5, 10, 15 e 20 kg e velocidades de 5, 10, 15 e 20 cm/s.

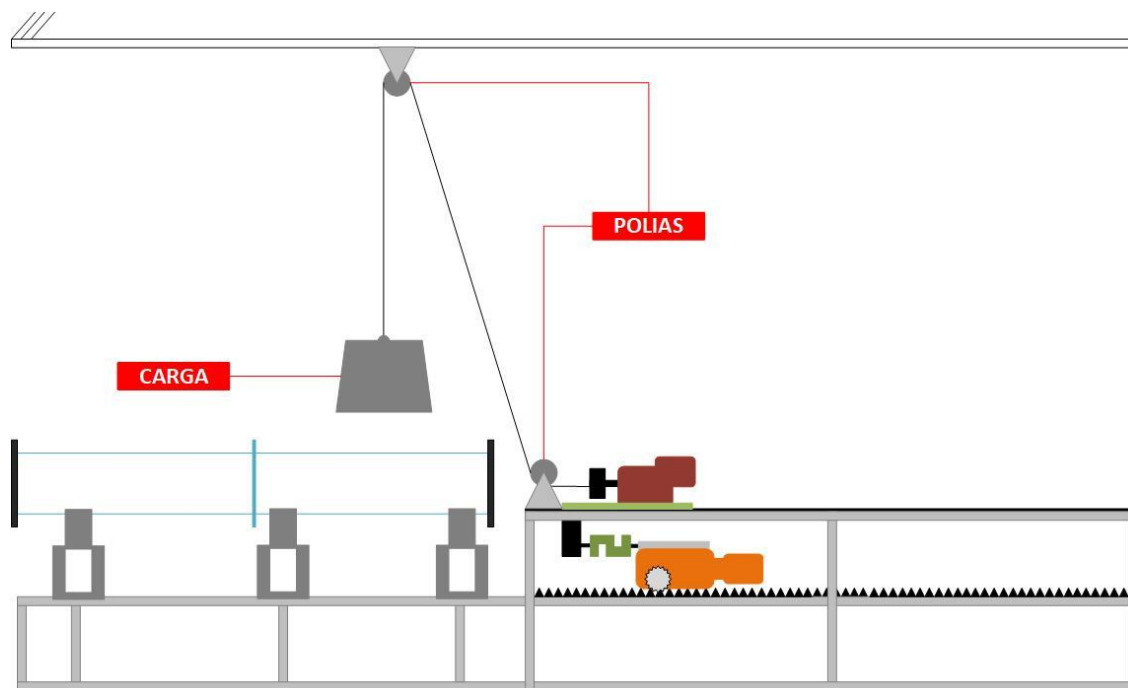


Figura 3.13 – Esquema do teste de elevação de carga. Autoria própria.

Os resultados, foram analisados no intervalo de tempo compreendido entre 11 e 17 s, visando selecionar uma seção do experimento em que a velocidade de içamento da carga fosse constante. Além disso, a seleção deste intervalo excluiu as oscilações da força de tração observadas para o tempo igual a 8,5 s. Tais variações foram geradas devido a irregularidade presente na junção entre as cremalheiras. Quando as engrenagens do redutor passam sobre este ponto ocorre uma perturbação do sistema e, conseqüentemente, na célula de carga, provocando assim, uma oscilação de grande amplitude na força de tração medida. Na Figura 3.14, estão contidos os resultados obtidos para os testes de carga para a velocidade de içamento igual a 10 cm/s. A curva laranja, corresponde aos valores de tração obtidos durante a movimentação do sistema sem carga. Já as curvas vermelha, verde, azul e cinza correspondem, respectivamente, aos testes de içamento das cargas de 5, 10, 15 e 20 kg. O intervalo de análise está contido entre as duas retas verticais vermelhas.

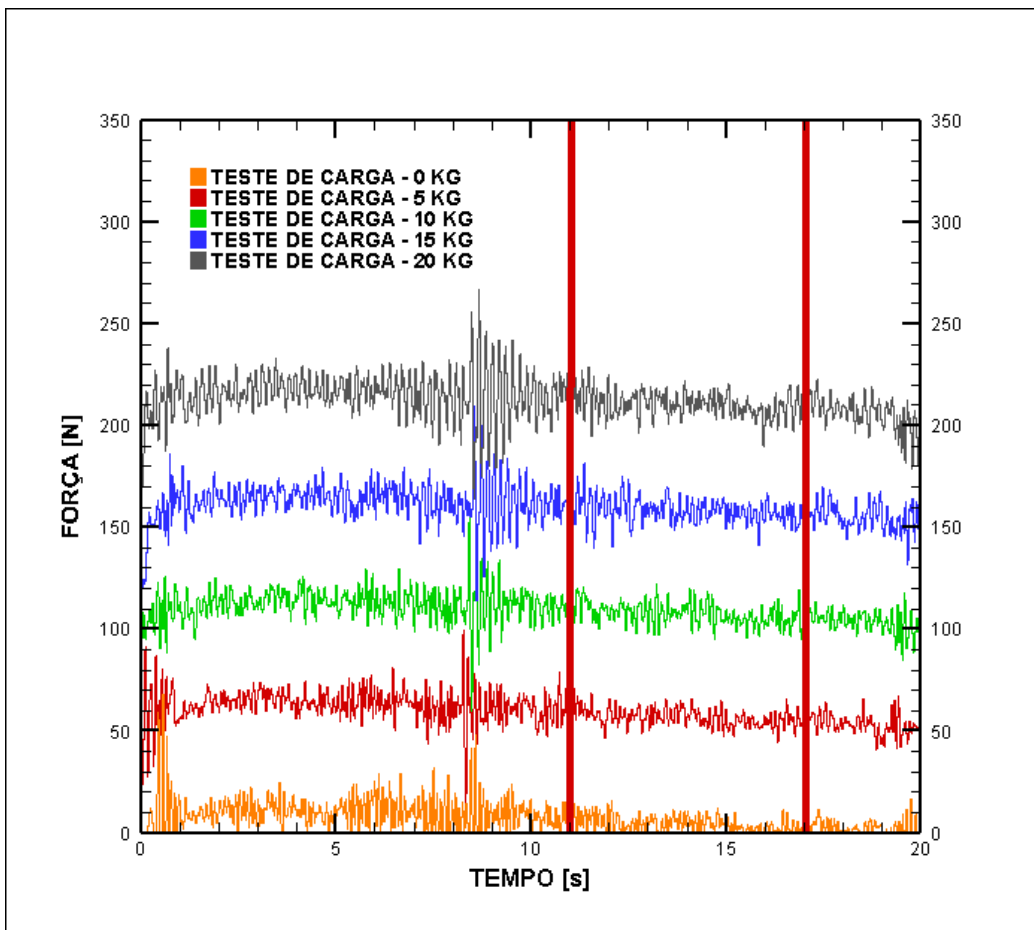


Figura 3.14 – Teste da carga para a velocidade de 10 cm/s.

Por fim, foram calculados o valor médio da tração ( $T_M$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ). Na Tabela 3.1, estão contidos os valores calculados, a massa ( $m_c$ ) e o peso ( $P_c$ ) de cada carga. A expectativa inicial para estes testes foi confirmada, os valores de  $T_M$  são compostos por uma parcela referente ao peso da carga ( $P_c$ ) e por outra relacionada as forças de atrito do sistema. A parcela atribuída ao atrito pode ser visualizada na última linha da Tabela 3.1 Foi possível observar que esses valores aumentam com a elevação de  $P_c$ , o que pode ser explicado pelo aumento do atrito entre as polias e o cabo de aço à medida em que  $m_c$  se torna maior. Portanto, esses resultados comprovaram que a célula de carga é capaz de mensurar forças de resistência ao deslocamento do sistema de maneira satisfatória.

INTERVALO ANALISADO – 11 a 17 s				
$m_c$ [KG]	5	10	15	20
$P_c$ [N]	50	100	150	200
$T_M$ [N]	56,49	107,5	158,2	210,3
$s_{T_M}$ [N]	4,634	5,316	6,101	6,035
$(T_M - P_c)$ [N]	6,49	7,5	8,2	10,3

Tabela 3.1 – Resultados dos testes de elevação de carga para velocidade igual à 10 cm/s.

Adicionalmente, estes experimentos mostraram que imperfeições nas cremalheiras poderiam afetar sensivelmente a interpretação dos dados coletados pela célula de carga. Dessa forma, para suavizar as interferências causadas por imperfeições estruturais, os testes de arrasto foram analisados com o auxílio da média móvel. Na Figura 3.15, está indicado o efeito da utilização da média móvel sobre o teste de elevação de carga de 5 kg, onde é possível observar que a oscilação da força medida é suavizada com eficácia. A oscilação decorrente das cremalheiras está circulada na Figura 3.15.

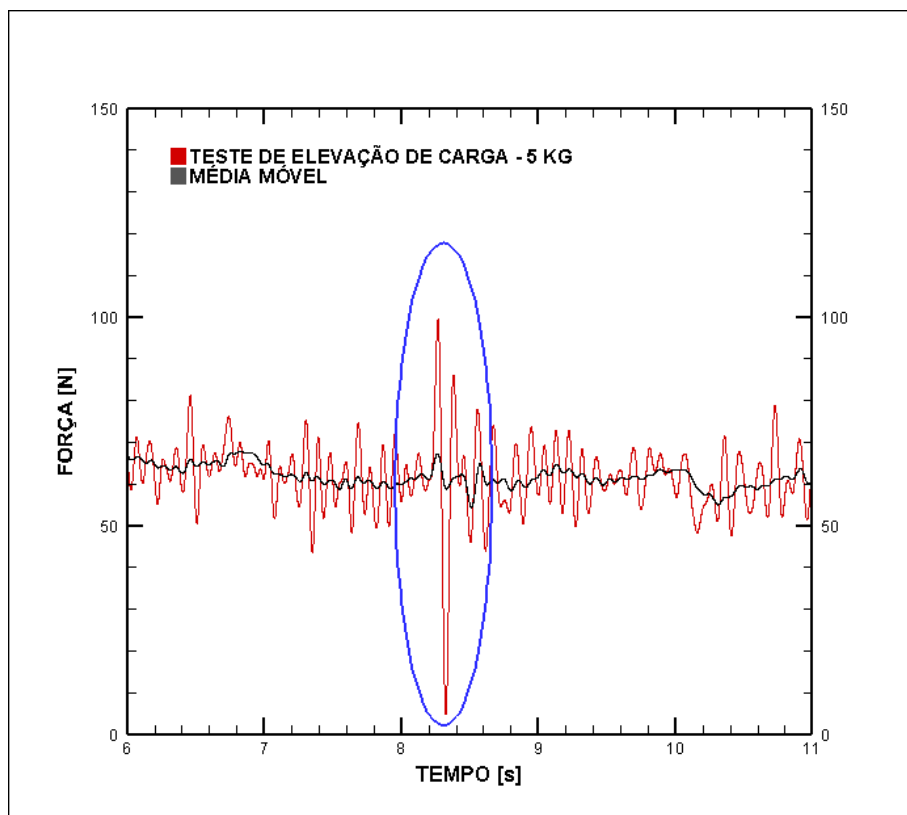


Figura 3.15 – Atenuação da oscilação da tração com o auxílio da média móvel.

### 3.5. Procedimento experimental

Nesta seção são detalhados os procedimentos experimentais desenvolvidos para realizar os testes de arrasto. Tal metodologia foi empregada sem alterações durante toda a bateria de testes, visando manter a repetibilidade dos resultados obtidos. O procedimento experimental foi organizado nas seguintes etapas:

- 1) Ligar os componentes da unidade experimental;
- 2) Formar o leito de cascalhos;
- 3) Acoplar a broca e posicionar a coluna para o início do teste;
- 4) Fechar as aberturas da tubulação de acrílico;
- 5) Preencher as tubulações de acrílico com o fluido de trabalho;
- 6) Abrir a válvula do reservatório;
- 7) Acionar a gravação de dados;
- 8) Iniciar o teste através do *Lightening*;
- 9) Ao final do teste, interromper a gravação de dados;
- 10) Fechar a válvula do reservatório;
- 11) Drenar o fluido das tubulações de acrílico;
- 12) Medir o comprimento do plugue e a distância percorrida pela broca;

Inicialmente, deve-se energizar os equipamentos da unidade experimental e ligar os softwares de controle e medição, conforme descrito na seção 3.3, intitulada Funcionamento da unidade experimental. Feito isso, a coluna deve ser deslocada até a posição inicial de formação do leito. Então, o centralizador e o nivelador de leito devem ser acoplados à coluna, conforme indicado na Figura 3.16 a. Após estas etapas, o cascalho é introduzido através da abertura e a coluna é deslocada, fazendo com que o nivelador atinja o flange de aço inox e, conseqüentemente, nivele o leito na altura desejada, de acordo com as Figuras 3.16 b e c. De forma similar ao procedimento descrito, o restante do leito é formado. Sua configuração final está indicada na Figura 3.16 d. Por fim, o nivelador e o centralizador são retirados pelas aberturas da tubulação de acrílico, a broca é conectada à coluna e o conjunto (broca/coluna) é deslocado até a posição inicial de teste, conforme ilustrado na Figura 3.16 e.

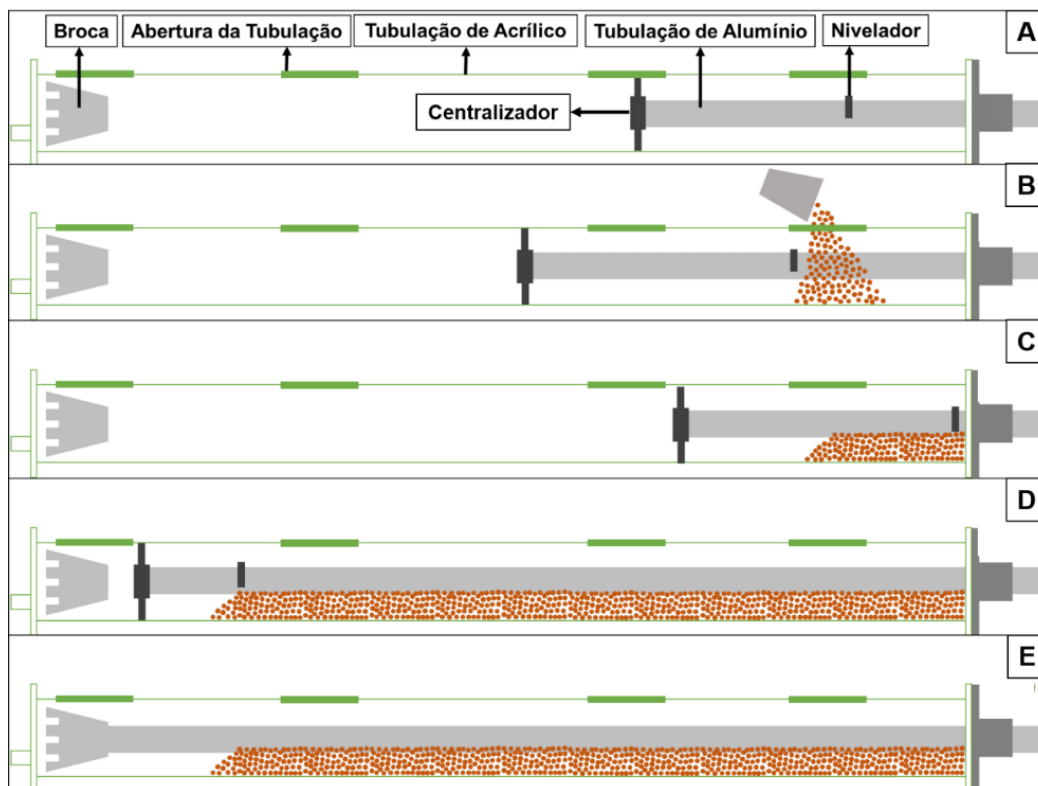


Figura 3.16 – Etapas do nivelamento do leito: (a) posição inicial dos elementos; (b) inserção dos cascalhos através da escotilha; (c) nivelamento do leito; (d) configuração final do leito; (e) posição final dos elementos e leito nivelado. Autoria própria.

O próximo passo consiste em fechar as aberturas das tubulações de acrílico com o auxílio de 4 tampas delgadas de aço carbono e um conjunto de 24 abraçadeiras. Vale ressaltar, que para o correto preenchimento dessas tubulações, orifícios são mantidos abertos em cada uma dessas tampas e na coluna de alumínio, possibilitando assim a expulsão de todo o ar do sistema. Na Figura 3.17, os círculos vermelhos indicam a localização desses orifícios. Em seguida, a válvula do reservatório é aberta, o que permite o escoamento do fluido para o interior dos tubos de acrílico. Quando o fluxo sai pelos orifícios, estes são fechados juntamente com a válvula mencionada.

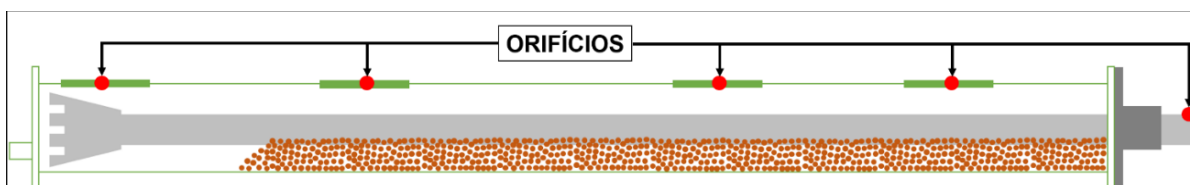


Figura 3.17 – Localização dos orifícios nas escotilhas e na coluna de alumínio. Autoria própria.



Terminado o processo de preparação do experimento, deve-se abrir a válvula do reservatório, para que durante o deslocamento da coluna não haja a criação de vácuo dentro das tubulações de acrílico. A seguir, o comando de gravação de dados no *LabView* é acionado e, posteriormente, o de início do teste (início da movimentação da coluna). Então, com o auxílio de uma câmera, o teste é gravado. Isto é extremamente importante, pois permite que os eventos ocorridos durante a realização do experimento sejam relacionados com as variações da tração medida. A seguir, ao final do teste, a coluna entra em repouso, a gravação de dados é interrompida e a válvula do reservatório é fechada. Só então, o fluido é drenado das tubulações de acrílico por meio da atuação da bomba pneumática. Por fim, o comprimento do plugue de cascalhos e a distância percorrida pela broca são medidos.

## 4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos testes de arrasto, que estão divididos em duas partes. A primeira é responsável por expor os resultados de forma qualitativa, abordando o comportamento do leito de cascalhos durante a execução dos experimentos. Na segunda, os resultados são analisados de maneira quantitativa, destacando a influência de cada variável de interesse sobre o arrasto atuante na coluna.

### 4.1. Análise do comportamento do leito de cascalhos

Foi realizada uma análise qualitativa dos resultados para caracterizar o comportamento do leito de cascalhos durante a realização dos testes. Como condição inicial, considera-se que as tubulações de acrílico estão preenchidas com água, o leito está nivelado e a coluna está posicionada no marco zero da trajetória de deslocamento, conforme indicado na Figura 4.1 a. Inicialmente, a coluna se desloca do ponto X (marco zero) por 70 cm em uma região da tubulação que contém somente água. Após percorrer esta distância, a broca entra em contato com o leito de cascalhos e a sua velocidade encontra-se constante. A partir de então, o movimento de translação da broca através do leito ocasionará acúmulo gradativo de cascalhos junto a este elemento, formando assim, uma duna de partículas, como mostrado na Figura 4.1 b. Em seguida, foram observados 3 comportamentos distintos do leito. No primeiro, o acúmulo de cascalhos ganha altura até atingir a parte superior da tubulação de acrílico, formando um plugue. Em seguida, o comprimento do plugue aumenta e, conseqüentemente, o seu volume. Caso o plugue atinja um comprimento crítico, ocorrerá o aprisionamento da coluna, conforme ilustrado na Figura 4.1 c. O segundo comportamento possível, se diferencia do primeiro por não haver o aprisionamento da coluna, mesmo havendo a formação do plugue. Neste caso, o plugue atinge um comprimento máximo, ou seja, o volume de partículas que escoam pela área transversal livre entre o poço e a broca é igual ao montante que se acumula no plugue. Dessa forma, a coluna percorre 2,94 m até atingir o final do percurso, ponto Y, indicado na Figura 4.1 d. Por fim, o terceiro comportamento se caracteriza pela não formação do plugue e o deslocamento da coluna até o ponto Y, como mostrado na Figura 4.1 e.

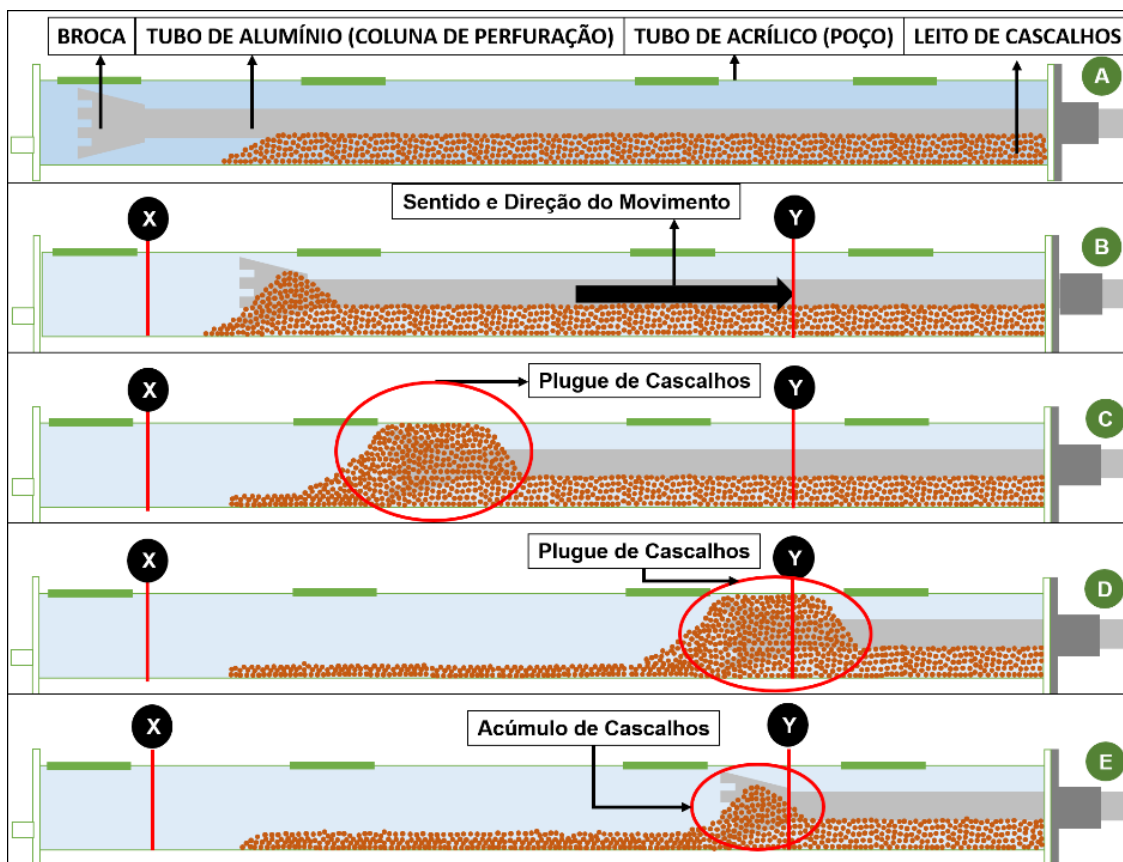


Figura 4.1 – Comportamento do leito durante os testes: (a) posição inicial de teste; (b) acúmulo de cascalhos junto a broca; (c) aprisionamento causado pelo plugue; (d) plugue e coluna na posição final de teste; (e) coluna e acúmulo de cascalhos na posição final de teste. Autoria própria.

O comportamento do leito durante os experimentos indicou a necessidade de criação de 2 parâmetros de caracterização: o comprimento de plugue e a distância percorrida pela broca. Essa estratégia permitiu a comparação dos testes, utilizando esses parâmetros em conjunto com a força de tração aplicada na coluna. No entanto, a tarefa de avaliar a extensão do plugue em movimento não é trivial. Então, ficou determinado que o plugue seria medido ao final de cada teste, conforme indicado na Figura 4.2 a, onde  $L_p$  representa o comprimento do plugue.

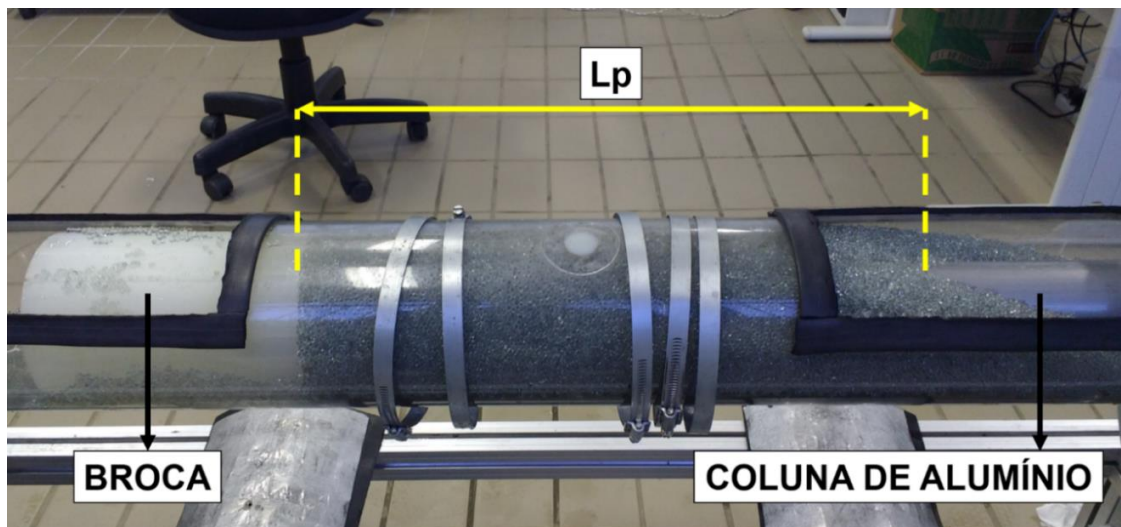


Figura 4.2 – Comprimento do plugue. Autoria própria.

#### 4.2. Interpretação dos testes de arrasto

A tração mensurada pela célula de carga é uma composição de inúmeros esforços que resistem ao deslocamento da coluna, ou seja, os dados coletados por este equipamento não correspondem somente ao arrasto decorrente da presença do leito na tubulação de acrílico. Dessa forma, a interpretação dos testes de arrasto exigiu a criação de uma metodologia capaz de individualizar a parcela da tração correspondente ao arrasto. Para tanto, foram realizados testes de movimentação da coluna com a tubulação de acrílico preenchida apenas com água, visando assim, medir a força necessária para movimentar todo o sistema na ausência do leito de cascalhos. Assim, os resultados coletados correspondem às forças que se opõem ao deslocamento da coluna, dentre elas, a força atrito entre a tubulação de alumínio e a vedação presente em um dos flanges de aço inox; a força de atrito nas cremalheiras e guias lineares; o arrasto gerado pelo deslocamento da coluna em meio líquido; e, a força necessária para deslocar todo o sistema. Portanto, para avaliar o arrasto decorrente da interação entre a broca e o leito, subtrai-se da força necessária para realizar um teste de arrasto (presença do leito de cascalhos) a força requerida para movimentar o sistema apenas com água nas tubulações de acrílico. Desta forma, obtém-se apenas a parcela da força de tração correspondente ao arrasto causado pelo leito de cascalhos.

Com esta metodologia aliada aos vídeos gravados durante os testes foi possível relacionar os valores de arrasto com o comportamento do leito. Na Figura 4.3, é mostrado o resultado de um teste de arrasto e de um de movimentação da coluna. Nota-se a proximidade entre os valores da força medida para o teste de movimentação e os coletados para o teste de arrasto, pois neste caso não houve a formação do plugue. A região A, indicada na Figura 4.3, representa o trecho no qual a broca se movimenta livremente por 70 cm até encontrar o leito de cascalhos, no ponto 1. Neste ponto, a coluna apresenta velocidade constante para todos os testes. Vale ressaltar que nos instantes iniciais uma tração elevada é requerida para retirar todo o sistema da inércia, o que justifica as oscilações observadas até os 2 s. Na região B, a broca se desloca através do leito até encontrar o ponto 2, que indica o momento em que a broca inicia a passagem sob a primeira escotilha da tubulação. Foi importante demarcar este evento para todos os testes, pois a broca entra em contato com as escotilhas ao se deslocar sob estas, o que gera grande oscilação da força de tração. Portanto, valores de força coletados durante este evento foram desconsiderados. O ponto 3, localizado na região C, indica o contato da broca com a primeira escotilha. Já o ponto 4 demarca o momento no qual a broca ultrapassa esta escotilha. A região D representa o trecho mais adequado para análise do arrasto, pois a broca interage apenas com o fluido, com os cascalhos e com as paredes internas da tubulação de acrílico. Nesta região, a incerteza expandida ( $U_{\bar{x}}$ ) das medições é igual à 2,68 N para 16 s, 14,7 N para 18 s e 15,1 N para 20 s, tais cálculos estão detalhados no Apêndice A. O ponto 5 representa o momento no qual a broca inicia a passagem pela segunda escotilha e demarca o início da região E. Dessa forma, o ponto 6 indica o contato entre a broca e a segunda escotilha e o ponto 7 representa o momento no qual a broca ultrapassa a segunda tampa. Por fim, na região F a broca se desloca através do leito e desacelera até entrar em repouso (ponto 8).

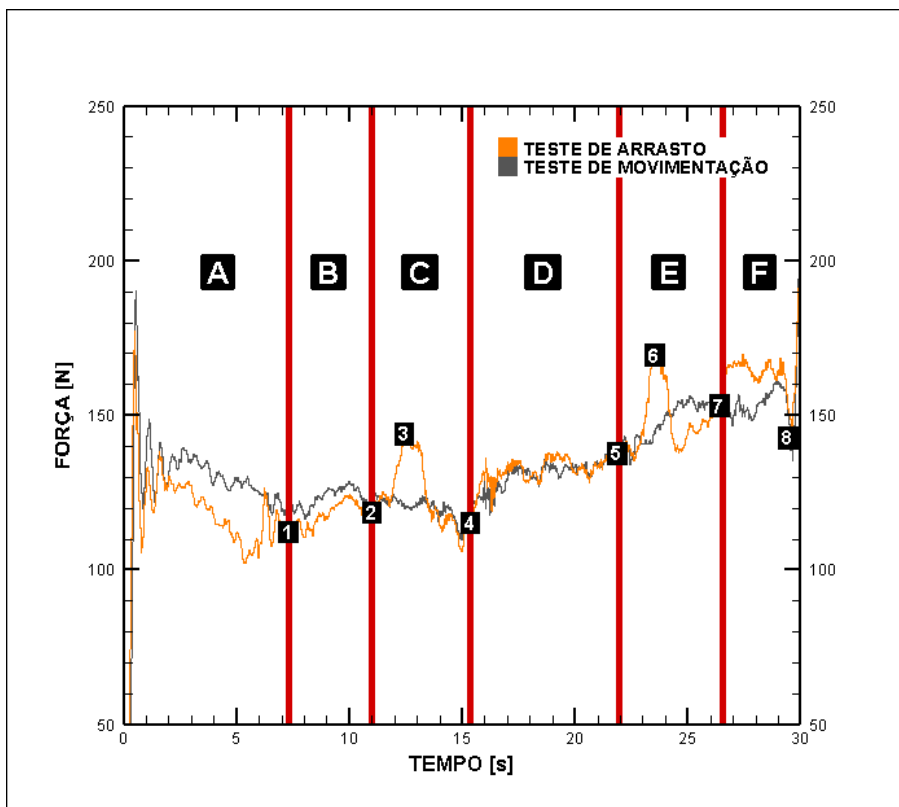


Figura 4.3 – Interpretação dos resultados de um teste em que não houve formação de plugue.

A interpretação do gráfico anterior indicou que quando não ocorre a formação do plugue, as forças medidas para um teste de arrasto são muito próximas com as de um teste de movimentação. Para o experimento em questão, pode-se considerar que o arrasto causado pelo leito de cascalhos é irrelevante. No entanto, em alguns trechos da Figura 4.3 é possível notar que a curva cinza (teste de movimentação) possui valores mais elevados que a curva laranja (teste de arrasto), o que não era esperado. Tal fato pode ser explicado pela alteração da lubrificação do sistema e pelo desgaste das peças de vedação ocorridas entre a realização dos testes de arrasto e a dos experimentos de movimentação.

Prosseguindo com a análise, pode-se observar na Figura 4.4 o resultado de um teste em que ocorreu a formação do plugue e o não aprisionamento da coluna. Na região A, tem-se o trecho no qual a coluna sai do repouso e se movimenta livremente até atingir o leito de cascalhos, instante indicado na Figura 4.4 com o número 1. Em seguida, já na região B, nota-se o aumento do arrasto decorrente do acúmulo de cascalhos próximo à broca e a formação do plugue (ponto 2). Na região C, é possível observar a oscilação da

tração devido à passagem da broca sob a primeira escotilha. Os pontos 3 e 5 representam, respectivamente, o início e o final da passagem da broca sob a escotilha. Já o ponto 4 indica o instante no qual ocorreu o contato entre estes elementos. Na região D, o ponto 6 determina o momento no qual o plugue atinge a sua máxima extensão. No ponto 7, o plugue de cascalhos inicia a passagem sob a segunda escotilha, gerando leve alteração na força de tração. Portanto, o intervalo entre os pontos 6 e 7 é confiável para determinar o arrasto neste teste, uma vez que não há oscilações da tração devido ao contato entre a broca e as escotilhas. Nesta região, a incerteza expandida das medições é igual à 16,7 N para 17 s, 9,96 N para 18 s e 10,5 para 19 s. O ponto 8, determina o início da passagem da broca sob a segunda escotilha, bem como o começo da região E, que evidencia a alteração da força medida pelo mesmo motivo explanado para a região C. O ponto 9 indica o momento em que a broca entra em contato com a segunda escotilha, e o ponto 10 demarca o instante em que a broca ultrapassa esta região. Por fim, na região F ocorre a desaceleração da coluna e o fim do teste.

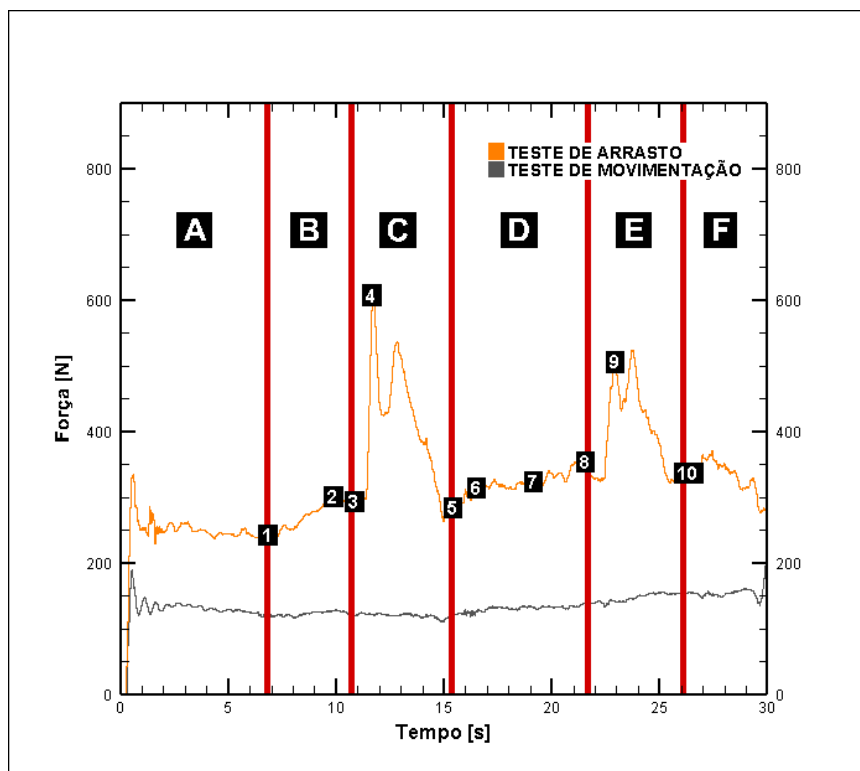


Figura 4.4 – Interpretação dos resultados de um teste em que houve a formação do plugue e não aprisionamento da coluna.

Na Figura 4.5 é mostrado o resultado de um teste em que houve a formação do plugue e o aprisionamento da coluna. Na região A, a coluna parte do repouso, adquire

velocidade constante e atinge o leito de cascalhos, ponto 1. Em seguida, nota-se o aumento da força de arrasto em função da interação entre a broca e o leito de cascalhos e a formação do plugue, instante indicado pelo número 2. Na região C, ocorre o contato entre a broca e a primeira escotilha e, conseqüentemente, a oscilação da força de tração. Este trecho está delimitado pelos pontos 3 e 5 que representam o início e o final da passagem da broca sob a primeira escotilha, respectivamente. Já o ponto 4 indica o instante em que se deu o contato entre a broca e a escotilha. É importante notar que mesmo com a oscilação presente na região C, o arrasto continua aumentando, o que indica o aumento do comprimento do plugue. Na região D, o arrasto aumenta progressivamente até ocorrer o aprisionamento da coluna, instante demarcado com o número 5. Nesta região, a incerteza expandida das medições é igual à 18,7 N para 15 s, 23,6 N para 15,5 s e 13,1 para 16 s. É importante ressaltar que o aprisionamento da coluna é determinado pelo limite de operação da célula de carga, no caso 750 N. Quando este valor é atingido, interrompe-se o funcionamento do sistema de movimentação, determinando assim o aprisionamento da broca.

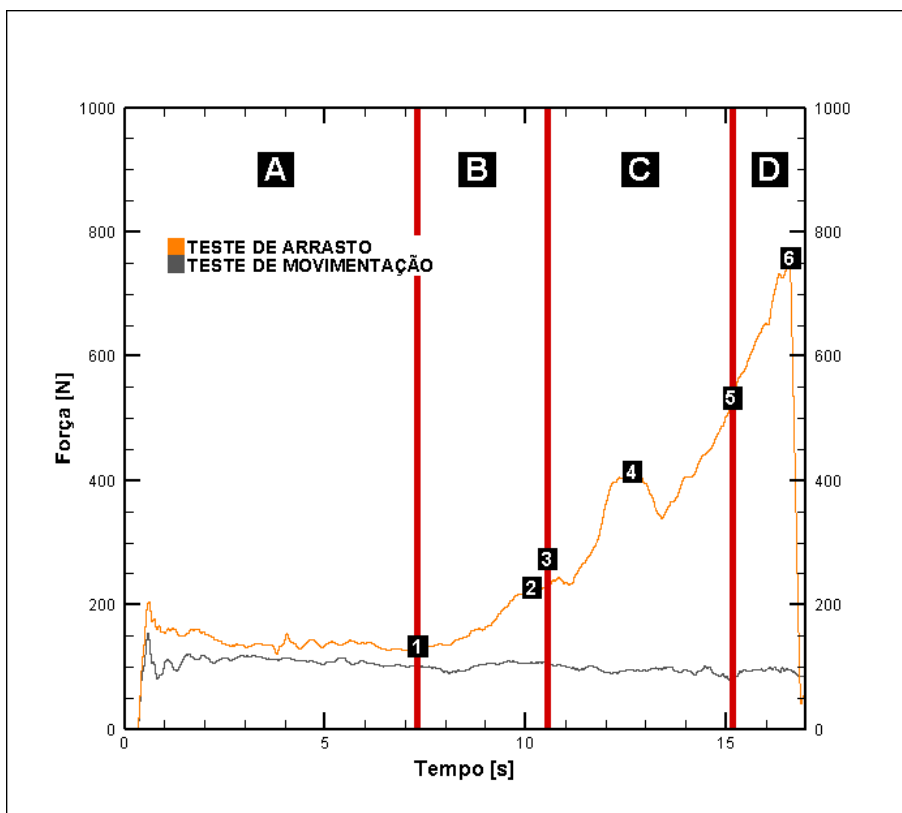


Figura 4.5 – Interpretação dos resultados de um teste em que ocorreu aprisionamento da coluna devido a formação do plugue.



Com base na interpretação dos testes e na metodologia utilizada foi possível relacionar o valor da força de arrasto com o comportamento do leito durante a movimentação da coluna. Além destas observações é importante compreender como se dá o aumento da tração aplicada sobre a coluna considerando o funcionamento do servo motor. À medida em que o volume de cascalhos próximo à broca aumenta com o deslocamento da coluna, o servo motor eleva o torque aplicado sobre o eixo conectado às cremalheiras para garantir que a velocidade de translação do sistema se mantenha constante, aumentando assim a tração aplicada sobre a célula de carga. Quando o volume de cascalhos ou o comprimento do plugue se mantem constantes, o servo motor passa a fornecer um valor constante de torque ao sistema, o que ocasiona a estabilização da tração medida.

#### 4.3. Influência da altura do leito sobre o arrasto

A metodologia desenvolvida possibilitou analisar a influência da altura do leito sobre o arrasto. Acredita-se que o aumento da altura do leito propicia a formação do plugue, o que ocasionaria a elevação do arrasto sobre a coluna de perfuração. Com o intuito de comprovar este comportamento, foram realizados testes de arrasto para 4 alturas de leito distintas, intituladas H1, H2, H3 e H4, que correspondem, respectivamente, a 90, 70, 50 e 33 mm, como mostrado na Figura 4.6. Vale ressaltar que os demais parâmetros foram mantidos constantes nestes experimentos, como especificados na Tabela 4.1.

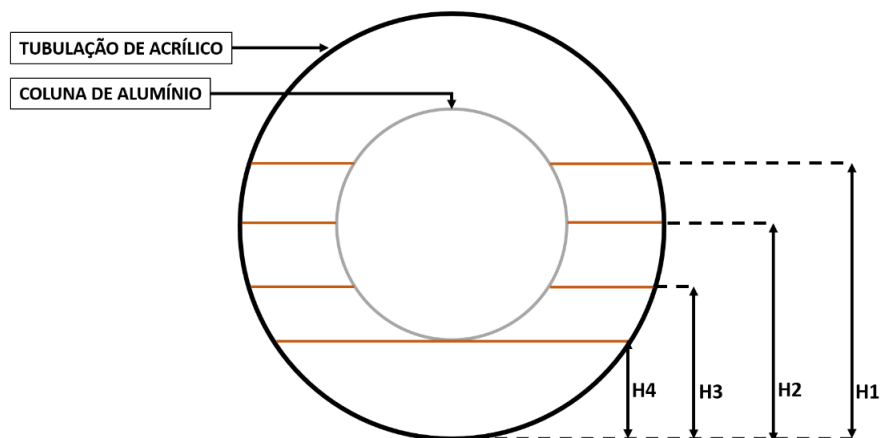


Figura 4.6 – Corte transversal da seção de testes, evidenciando as alturas de leito utilizadas.

<b>Velocidade de Translação [cm/s]</b>	10			
<b>Área Transversal da Broca [mm<sup>2</sup>]</b>	7804			
<b>Diâmetro dos Cascalhos [mm]</b>	2,8			
<b>Altura de Leito [mm]</b>	33	50	70	90
<b>Fluido de Trabalho</b>	Água			
<b>Aceleração da Coluna [cm/s<sup>2</sup>]</b>	20			
<b>Distância Percorrida [m]</b>	2,94			
<b>Número de Testes por Altura</b>	3			
<b>Total de Testes</b>	12			

Tabela 4.1 – Matriz de testes para avaliação da altura de leito.

Nesta bateria de ensaios foi utilizada uma broca com área transversal de 7804 mm<sup>2</sup>, intitulada broca tipo 1, como indicada na Figura 4.7 a. Este elemento foi usinado em polipropileno e possui uma geometria distinta das brocas utilizadas na perfuração de poços de petróleo. Esta estratégia foi adotada com o intuito de simplificar a análise da influência da área transversal da broca sobre o arrasto, que será abordada posteriormente. Para substituir os cascalhos reais, foram utilizadas esferas de vidro com diâmetro médio de 2,8 mm. Este material foi adotado para evitar que a tubulação de acrílico fosse danificada durante os testes, impedindo assim a visualização da movimentação do leito. A Figura 4.7 b apresenta um leito formado com o material citado.

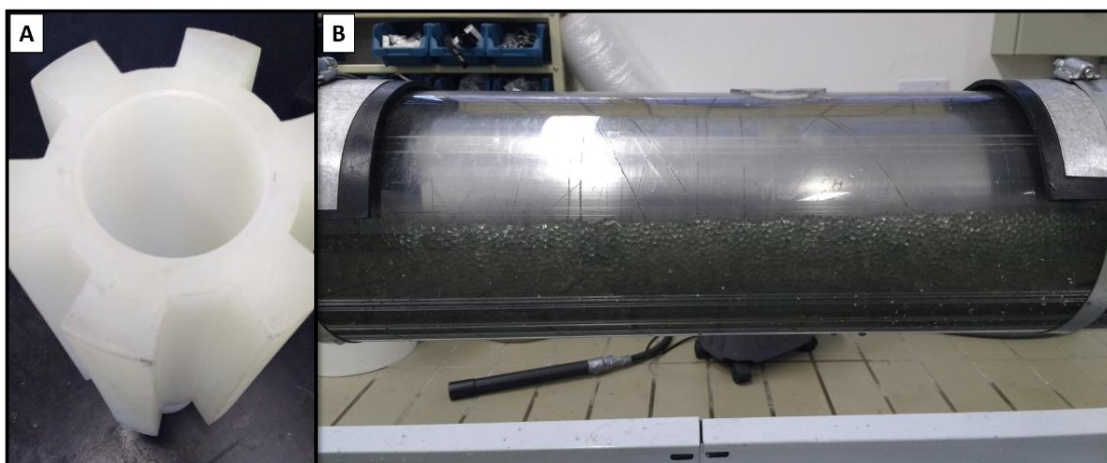


Figura 4.7 – Detalhes dos experimentos: (a) broca do tipo 1; (b) leito formado com as esferas de vidro. Autoria própria.

Concluídos os testes, foi possível observar que o arrasto sobre a coluna de perfuração aumenta com o incremento da altura do leito de cascalhos. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento da área de contato entre o leito e a coluna ( $A_c$ ) e pelo incremento da vazão de material sólido (cascalhos) que escoia através da área livre do poço. O aumento da área de contato se dá com a elevação da altura do

leito, o que implica em aumento da força de atrito entre a coluna e o leito. Isso foi constatado mediante análise da etapa inicial dos testes de arrasto, quando a broca se desloca livremente pela tubulação não interagindo com o leito. Portanto, a diferença de tração entre os testes com alturas distintas, nesta parte do experimento, se dá pela diferença entre as forças de atrito decorrente do contato entre a coluna e o leito. Na Figura 4.8, pode ser observada a fase inicial de 3 testes de arrasto realizados para alturas de leito distintas, H3 (curva verde), H2 (curva azul) e H1 (curva laranja). As curvas cinzas, as rosas e as pretas representam, respectivamente, as repetições dos testes para as alturas H3, H2 e H1, indicando boa repetibilidade destes testes. O ponto 1 indica o instante em que a coluna já atingiu velocidade constante e o ponto 2 representa o instante anterior ao contato da broca com o leito de cascalhos. Na Tabela 4.2 estão apresentadas as incertezas calculadas para o tempo igual à 2, 4 e 6 s.

	TESTES H3			TESTES H2			TESTES H1		
TEMPO [s]	2	4	6	2	4	6	2	4	6
$U_{\bar{x}}[N]$	5,36	2,33	6,67	12,2	11,6	2,68	11,0	11,8	10,7

Tabela 4.2 – Dados de incerteza expandida para os testes apresentados na Figura 4.8.

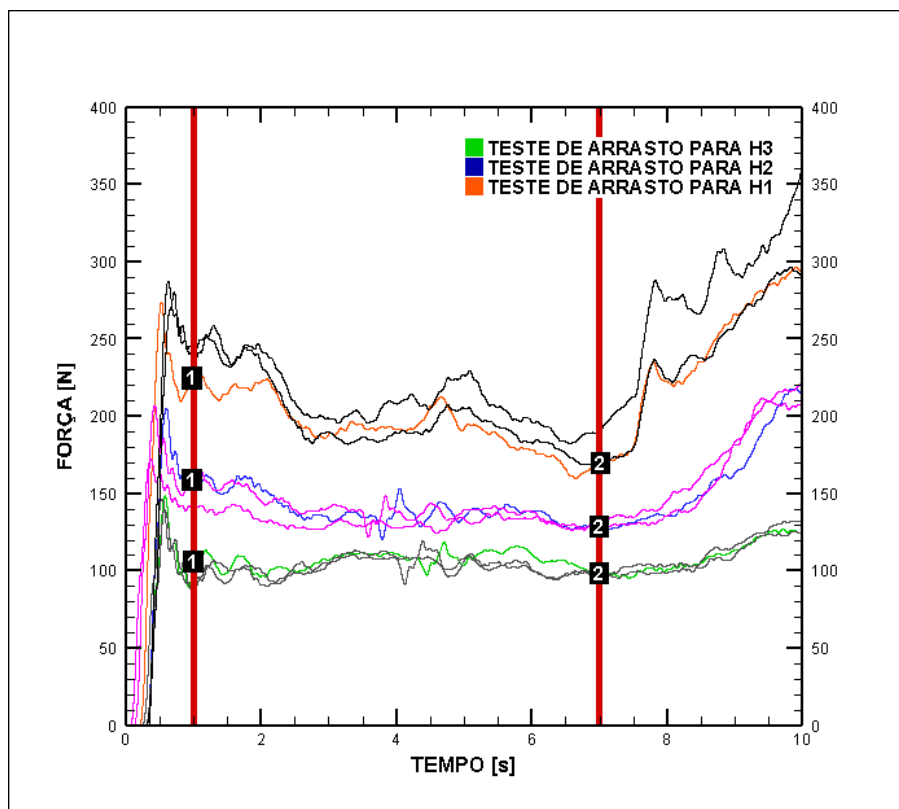


Figura 4.8 – Comparação entre as etapas iniciais dos testes de arrasto executados para as alturas H3, H2 e H1.

De posse dessas informações, foram calculadas as trações médias ( $T_M$ ) para o intervalo compreendido entre os pontos 1 e 2. Tais valores foram correlacionados com as áreas de contato entre a coluna e o leito para cada altura de leito. Os resultados desses cálculos estão indicados na Tabela 4.3, acompanhados dos desvios padrão ( $\sigma$ ) em relação aos valores médios. Analisando estes dados, nota-se uma relação linear entre os valores da área de contato e os valores de força média. Esta relação pode ser visualizada na Figura 4.9, que indica a equação da reta que melhor se ajusta aos valores em questão e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Vale ressaltar que quando o valor da área de contato é zero, a tração calculada pela equação é igual a  $-2,742$  N, o que indica inconsistência teórica. No entanto, a força média calculada possui uma parcela referente ao atrito do sistema, o que pode ter gerado este pequeno erro.

H [cm]	Ac [m <sup>2</sup> ]	T <sub>M</sub> [N]	σ [N]
50	3,32	107	5,29
70	4,66	138	9,89
90	6,02	193	16,4

Tabela 4.3 – Relação entre a área de contato entre a coluna e o leito e a força de tração média para as alturas H3, H2 e H1.

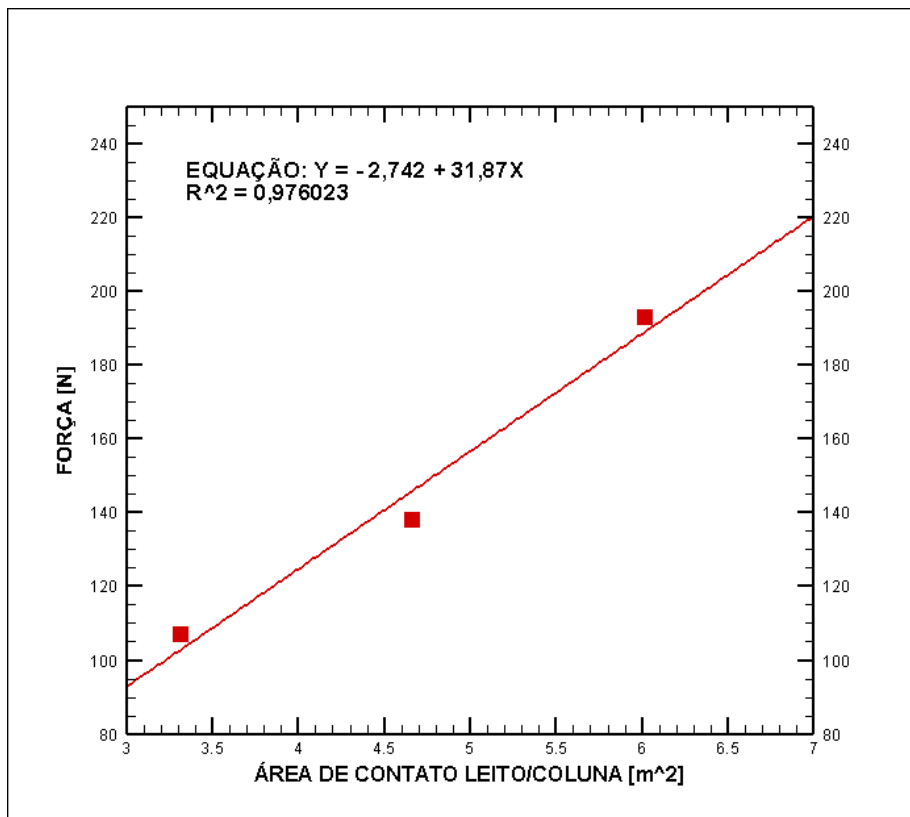


Figura 4.9 – Ajuste dos pontos experimentais da Tabela 4.2.

Além do exposto, o aumento da altura do leito eleva a concentração de cascalhos dentro da tubulação. Dessa forma, um volume maior de material sólido deve ser deslocado através da área livre da tubulação de acrílico a medida em que a altura do leito aumenta, acumulando um volume maior de cascalhos junto à broca. Isto aumenta a extensão do plugue e, conseqüentemente, o arrasto. Na Figura 4.10, pode-se observar os valores da força de arrasto em função do comprimento do plugue, o que sugere uma relação linear entre essas grandezas, uma vez que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), para um ajuste linear, é igual a 0,9617. Vale ressaltar que para a altura H4 não houve a formação do plugue, mas apenas acúmulo de cascalhos próximo à broca. O que proporcionou uma força de arrasto desprezível.

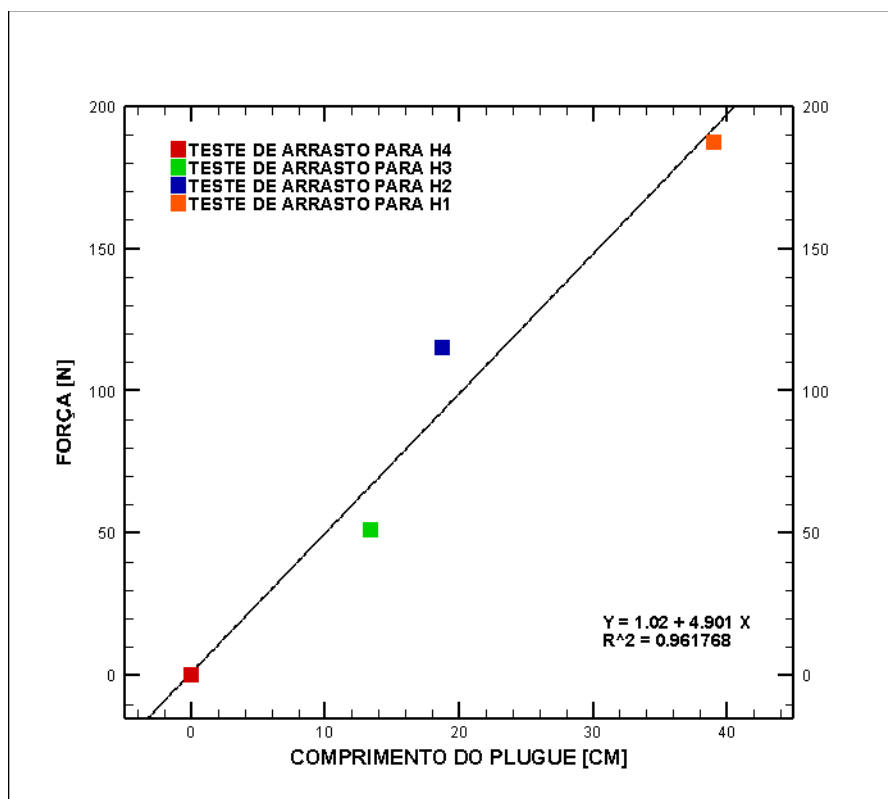


Figura 4.10 – Força de arrasto em função do comprimento do plugue.

Os resultados obtidos indicam que o aumento do comprimento do plugue eleva a força de arrasto sobre a coluna, que pode ser explicado pelo aumento do volume de cascalhos deslocado com a coluna. Quando o plugue se forma, os cascalhos se depositam na parte superior da coluna e quanto maior for o plugue maior será a área de contato entre o plugue e as paredes do poço, o que resulta no aumento da força de atrito,

intitulada  $F_{at}$ , conforme indicado na Figura 4.11. Tal esforço, atua no sentido oposto ao de deslocamento da coluna, causando o aumento da força de arrasto.

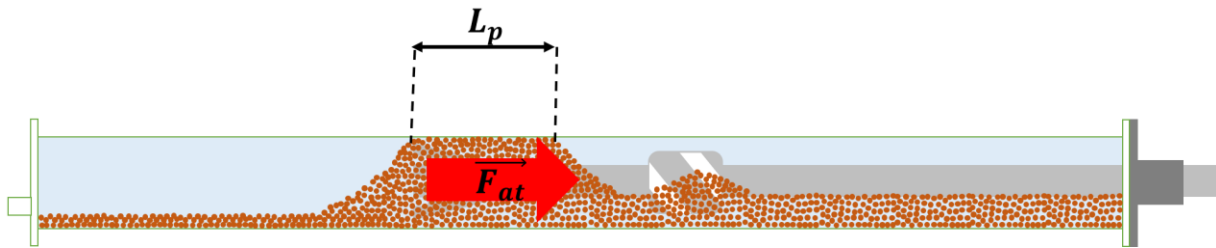


Figura 4.11 – Força de atrito entre a tubulação e o plugue.

Além disso, o plugue pode ser considerado como um meio poroso que restringe o escoamento do fluido deslocado pelo próprio plugue. Dessa forma, o escoamento da água ao longo do plugue gera uma diferença de pressão entre as regiões A e B, indicadas na Figura 4.12, ocasionando uma força contrária ao deslocamento da coluna, intitulada  $F_e$ . Este diferencial de pressão é diretamente proporcional ao comprimento do leito, conforme indicado pela Equação de Darcy, Equação 4.1, para escoamentos laminares (hipótese adotada) em meios porosos. Portanto, o aumento do comprimento do plugue ( $L_p$ ) eleva a diferença de pressão ( $\Delta p$ ) entre as regiões A e B e, conseqüentemente, a força  $F_e$ . Na Equação de Darcy,  $\mu_F$ , representa a viscosidade,  $q$ , a vazão de fluido,  $A$ , a área transversal do meio poroso e  $k$ , a permeabilidade do mesmo.

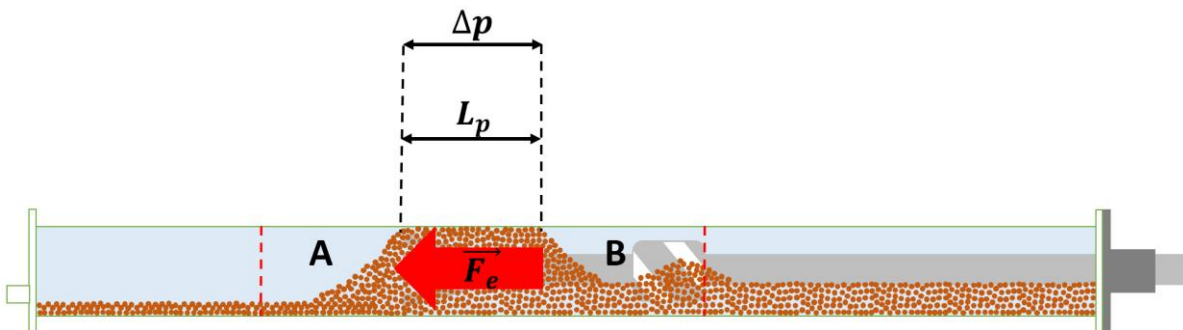


Figura 4.12 – Força decorrente do escoamento da água através do plugue.

$$\Delta p = \frac{\mu_F \cdot q \cdot L_p}{A \cdot k} \quad (4.2)$$

#### 4.4. Influência da área transversal da broca sobre o arrasto

A análise da influência da área transversal da broca sobre o arrasto foi realizada com o intuito de comprovar a relevância desta variável no problema. Acredita-se que o aumento da área transversal da broca dificulta o escoamento dos cascalhos durante o deslocamento da coluna, o que culminaria no aumento da extensão do plugue e, conseqüentemente, do arrasto. Para estudar a sensibilidade deste parâmetro, foram realizados testes de arrasto similares aos da seção anterior utilizando uma broca de área transversal maior, igual a 13097 mm<sup>2</sup>. Esta broca foi intitulada tipo 2. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros inerentes aos testes realizados nesta seção.

<b>Velocidade de Translação [cm/s]</b>	10			
<b>Área Transversal da Broca [mm<sup>2</sup>]</b>	13097			
<b>Diâmetro dos Cascalhos [mm]</b>	2,8			
<b>Altura de Leito [mm]</b>	33	50	70	90
<b>Fluido de Trabalho</b>	Água			
<b>Aceleração da Coluna [cm/s<sup>2</sup>]</b>	20			
<b>Distância Percorrida [m]</b>	2,94			
<b>Número de Testes por Altura</b>	3			
<b>Total de Testes</b>	12			

Tabela 4.4 – Matriz de testes para avaliação da área transversal da broca.

Após a realização desta bateria de experimentos, constatou-se que o aumento da área transversal da broca ocasiona a elevação da força de arrasto sobre a coluna. Isso já era esperado, pois o aumento da área transversal da broca gera a redução da área transversal livre entre este elemento e a tubulação de acrílico, o que dificulta a passagem dos cascalhos. Assim sendo, quanto maior for a área transversal da broca, mais cascalhos se acumulam próximo e mais extenso será o plugue. Isto foi comprovado mediante a comparação entre os testes efetuados para a altura de leito H4. No experimento realizado com a broca do tipo 1, de área transversal igual a 7804 mm<sup>2</sup>, não houve formação do plugue e o arrasto foi considerado irrelevante. Já o teste efetuado com a broca do tipo 2, de área transversal igual 13097 mm<sup>2</sup>, ocorreu a formação de um plugue de 21 cm de comprimento, que resultou na força de arrasto de 60 N. Comparações semelhantes não puderam ser realizadas para as demais alturas, pois os experimentos realizados para as alturas H3, H2 e H1 apresentaram o aprisionamento da coluna. Assim sendo, não foi possível mensurar a força de arrasto no momento em que

o plugue atingiu o comprimento constante, já que este parâmetro aumentou até o fim do teste. Nestes ensaios, o plugue cresceu até o momento do aprisionamento da coluna, momento em que, a força total de tração ultrapassou 750 N. Na Tabela 4.5, estão expostos os resultados dos testes de arrasto realizados com a broca do tipo 1 e com a broca do tipo 2 para facilitar a comparação, onde estão indicados a altura do leito (H), a força de arrasto ( $F_A$ ), o comprimento do plugue ( $L_p$ ), a distância percorrida pela broca ( $L_B$ ) e a informação se houve aprisionamento ou não durante o teste.

<b>BROCA TIPO 1</b>				
<b>H [mm]</b>	33	50	70	90
<b>F<sub>a</sub> [N]</b>	0	51	115	187
<b>L<sub>p</sub> [cm]</b>	0	13,4	18,8	39
<b>APRISIONAMENTO</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
<b>L<sub>B</sub> [cm]</b>	294,8	294,8	294,8	294,8
<b>BROCA TIPO 2</b>				
<b>H [cm]</b>	33	50	70	90
<b>F<sub>a</sub> [N]</b>	60	X	X	X
<b>L<sub>p</sub> [cm]</b>	21	45	50	52,5
<b>APRISIONAMENTO</b>	NÃO	SIM	SIM	SIM
<b>L<sub>B</sub> [cm]</b>	294,8	252,4	179,0	128,0

Tabela 4.5 – Resultados dos testes de arrasto realizados com as brocas do tipo 1 e 2 para a velocidade de 10 cm/s.

Apesar de não ter sido possível comparar os valores da força de arrasto entre os testes realizados com a broca do tipo 1 e 2 para as alturas H3, H2 e H1, estes experimentos foram úteis para comprovar que mantendo-se a área transversal da broca constante, o aumento da altura do leito ocasiona a formação precoce do plugue, acelera o seu crescimento e, conseqüentemente, o aprisionamento da coluna. Este fato pode ser comprovado por meio da análise da Figura 4.13, que mostra a força de tração em função do tempo para testes realizados com diferentes alturas de leito e a broca tipo 2. Nesta figura, pode-se observar que quanto maior a altura do leito, mais precocemente ocorrerá o aprisionamento da coluna, evento indicado pelo número 1 na figura. Vale ressaltar que os aprisionamentos foram registrados após a coluna percorrer 252,4, 179,0 e 128,0 cm após o início do deslocamento, para as alturas de leito H3, H2 e H1, respectivamente.



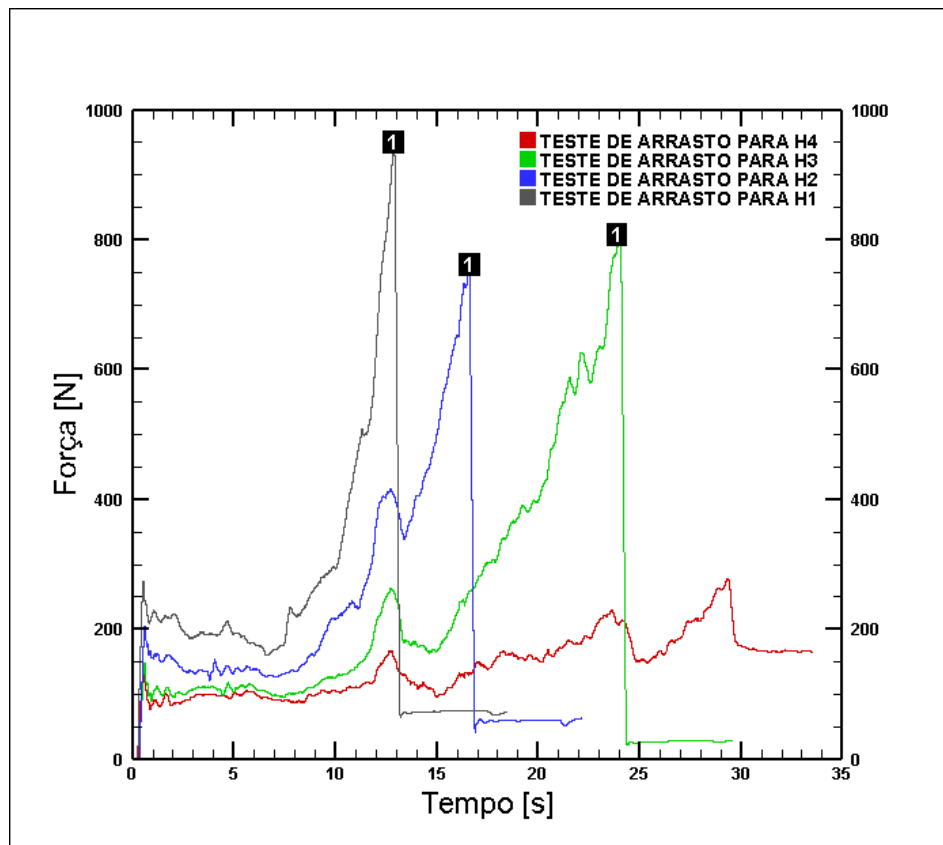


Figura 4.13 - Testes realizados com a broca tipo 2 para 4 alturas de leito distintas.

Além de estudar a influência do aumento da área transversal da broca sobre o arrasto, os testes executados nesta etapa visavam comprovar um resultado apresentado por RASI (1994). Em seu trabalho, o autor afirma que a força de arrasto aumenta exponencialmente quando a razão entre a área transversal da broca ( $A_{TB}$ ) e a área transversal livre do poço ( $A_L$ ) se aproxima de 1. No entanto, como não foi possível coletar valores da força de arrasto no regime transiente em todos os experimentos realizados com a broca do tipo 2, foram considerados valores anteriores ao aprisionamento da coluna para todas as alturas de leito e para pontos com a mesma distância percorrida pela broca. A tabela 4.5 apresenta os valores da força de arrasto ( $F_A$ ) coletados para cada uma das razões entre a área transversal da broca e a área livre da tubulação. A Figura 4.14 mostra os resultados da Tabela 4.6 e o ajuste de uma função exponencial para estes valores, com coeficiente de determinação igual à 0,962.

$F_a$ [N]	$A_{TB}/A_L$
44	1,027
105	1,161
511	1,314
1060	1,514

Tabela 4.6 – Força de arrasto em função de  $A_{TB} / A_L$  para a broca do tipo 2.

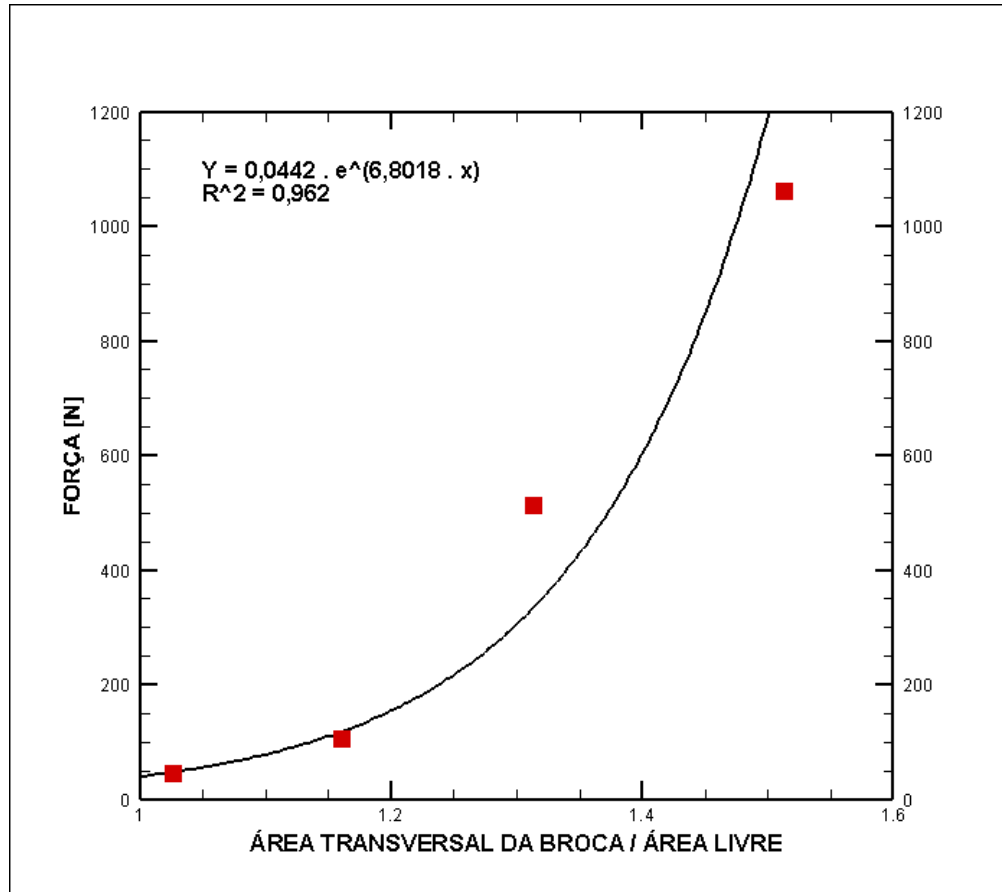


Figura 4.14 – Ajuste dos dados expostos na Tabela 4.5.

O coeficiente de determinação do ajuste realizado indica que a tendência observada por RASI (1994) é verdadeira. No entanto, esta análise precisa ser ampliada para uma gama maior de valores da razão  $A_{TB} / A_L$  para a mesma broca. Isso não foi possível pois a broca do tipo 2 forneceu apenas as razões ( $A_{TB} / A_L$ ) mostradas na Tabela 4.6, e a broca do tipo 1 forneceu apenas as razões expostas na Tabela 4.7. O ajuste dos resultados desta tabela com uma função linear está indicado na Figura 4.15 e apresenta o coeficiente de determinação igual a 0,9975. Vale ressaltar, que a função é válida apenas para valores de  $A_{TB} / A_L$  superiores a 0,6119.

$F_a$ [N]	$A_{TB} / A_L$
0	0,6119
46	0,6918
107	0,7831
169	0,9020

Tabela 4.7 – Força de arrasto em função de  $A_{TB} / A_L$  para a broca do tipo 1.

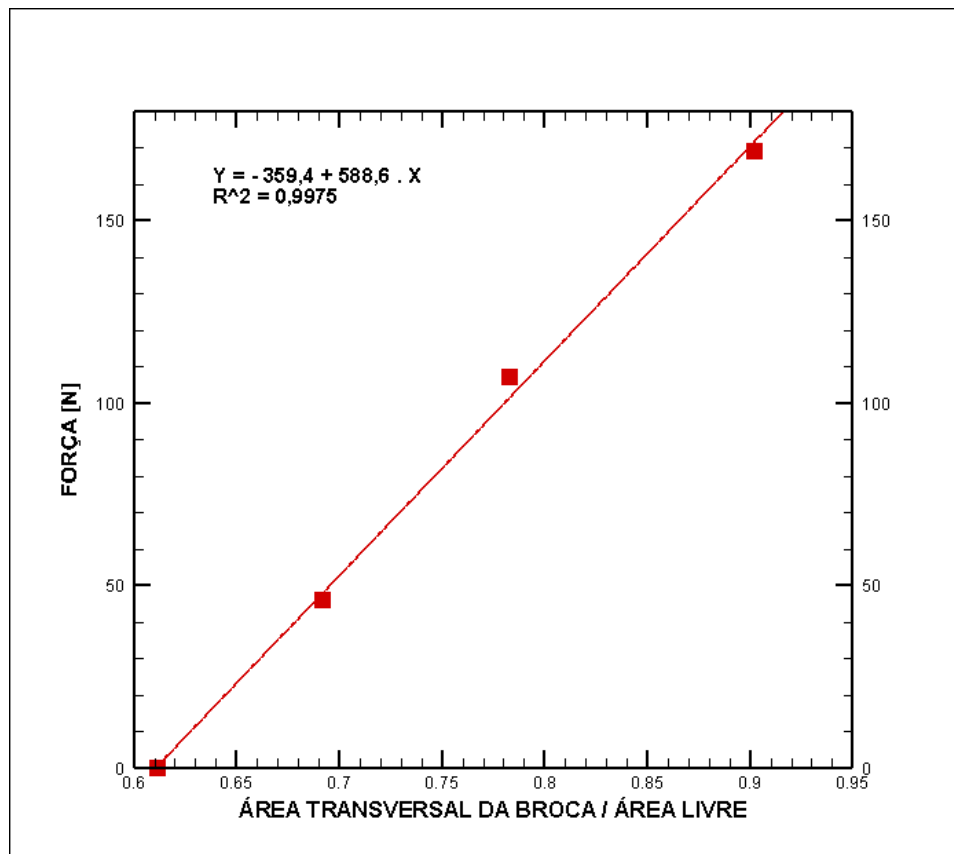


Figura 4.15 – Ajuste dos dados expostos na Tabela 4.6.

#### 4.5. Influência da velocidade de translação

O aumento da velocidade de translação da coluna eleva a vazão de fluido que escoar através da área livre da tubulação durante o deslocamento da broca. Por este motivo, supõe-se que o escoamento dos cascalhos pode ser facilitado com o aumento desta variável. Portanto, para avaliar esta suposição foram realizados 96 testes de arrasto similares aos executados nas seções anteriores para as velocidades de 20, 30, 40 e 50 cm/s. Tais experimentos foram realizados para todas as alturas de leito já

mencionadas, bem como para as brocas do tipo 1 e 2. Na Tabela 4.8, estão indicados os parâmetros referentes a esta bateria de testes.

<b>Velocidade de Translação [cm/s]</b>	20	30	40	50
<b>Área Transversal da Broca [mm<sup>2</sup>]</b>	7804		13097	
<b>Diâmetro dos Cascalhos [mm]</b>	2,8			
<b>Altura de Leito [mm]</b>	33	50	70	90
<b>Fluido de Trabalho</b>	Água			
<b>Aceleração da Coluna [cm/s<sup>2</sup>]</b>	20			
<b>Distância Percorrida [m]</b>	2,94			
<b>Número de Testes por Altura</b>	3			
<b>Total de Testes</b>	12			

Tabela 4.8 – Matriz de testes para avaliação da velocidade de translação.

Observou-se que o aumento da velocidade de translação da coluna facilita o escoamento dos cascalhos através da área transversal livre entre a tubulação de acrílico e a broca. Isso ficou comprovado, pois na maioria dos testes o aumento da velocidade de translação da coluna gerou a redução da extensão do plugue e, conseqüentemente, da força de arrasto. No entanto, este comportamento não foi observado em todos os experimentos. Para os testes realizados com a broca do tipo 1 e altura de leito H4, o aumento da velocidade de translação da coluna não significou alterações nos resultados, já que os testes efetuados para as velocidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm/s não apresentaram formação de plugue, conseqüentemente a força de arrasto foi desprezível. Já os experimentos executados com a broca do tipo 1 e com altura de leito H3 comprovaram que o aumento da velocidade de translação reduz o acúmulo de cascalhos próximo à broca, haja visto que houve formação do plugue para a velocidade de 10 cm/s e o mesmo não ocorreu para as velocidades mais elevadas, conforme indicado na Tabela 4.9. Analisando os resultados, pode-se observar que a força de arrasto não tem redução significativa para o teste com velocidade de 20 cm/s mesmo com a ausência de plugue. Isso ocorreu devido ao acúmulo de cascalhos observados junto a broca. Para velocidades mais elevadas (30, 40 e 50 cm/s) o volume de cascalhos próximo a broca foi insignificante, o que representou uma redução de 53 % da força de arrasto em relação ao teste com velocidade de 10 cm/s.

<b>Velocidade de Translação [cm/s]</b>	<b>Altura do Leito [mm]</b>	<b>Extensão do Plugue [cm]</b>	<b>F<sub>a</sub> [N]</b>
10	50	13,4	51
20	50	0	50
30	50	0	24
40	50	0	30
50	50	0	24

Tabela 4.9 – Resultados dos testes de arrasto realizados com a broca do tipo 1 e altura de leito H3.

Já os testes realizados com a broca tipo 1 e altura de leito H2 e H1 apresentaram comportamento semelhante. Nestes experimentos, o aumento da velocidade de translação da coluna ocasionou a redução da extensão do plugue de maneira progressiva até a velocidade de 30 cm/s. Para a velocidade igual a 40 cm/s, o comprimento do plugue aumentou, e para a velocidade de 50 cm/s, reduziu novamente. Já a força de arrasto, para ambos os casos, apresentou redução significativa apenas da velocidade de 10 cm/s para de 20 cm/s. Os resultados mencionados estão contidos nas Tabela 4.10 e 4.11.

<b>V<sub>T</sub> [cm/s]</b>	<b>H [mm]</b>	<b>L<sub>P</sub> [cm]</b>	<b>F<sub>a</sub> [N]</b>
10	70	18,8	115
20	70	10	74
30	70	7,1	75
40	70	8,6	102
50	70	6,0	77

Tabela 4.10 – Resultados dos testes de arrasto realizados com a broca do tipo 1 e altura de leito H2.

<b>V<sub>T</sub> [cm/s]</b>	<b>H [mm]</b>	<b>L<sub>P</sub> [cm]</b>	<b>F<sub>a</sub> [N]</b>
10	90	39,0	187
20	90	18,3	148
30	90	16,9	171
40	90	18,5	209
50	90	15,5	246

Tabela 4.11 – Resultados dos testes de arrasto realizados com a broca do tipo 1 e altura H1.

De posse desses resultados, concluiu-se que a elevação da velocidade de translação da coluna causa a redução da extensão do plugue e do arrasto até determinado ponto, e que a partir de certa velocidade este comportamento não é mais observado. A redução do comprimento do plugue é explicada pelo aumento da vazão de

fluido pela área transversal entre a tubulação de acrílico e a broca, mostrada na Figura 4.16 a. Então, a medida em que a velocidade de translação da coluna aumenta, o volume de líquido deslocado pela broca também se eleva, aumentando assim a velocidade média do escoamento. Na Figura 4.16.b está representado o perfil de velocidades esperado para a região por onde escoam os cascalhos.

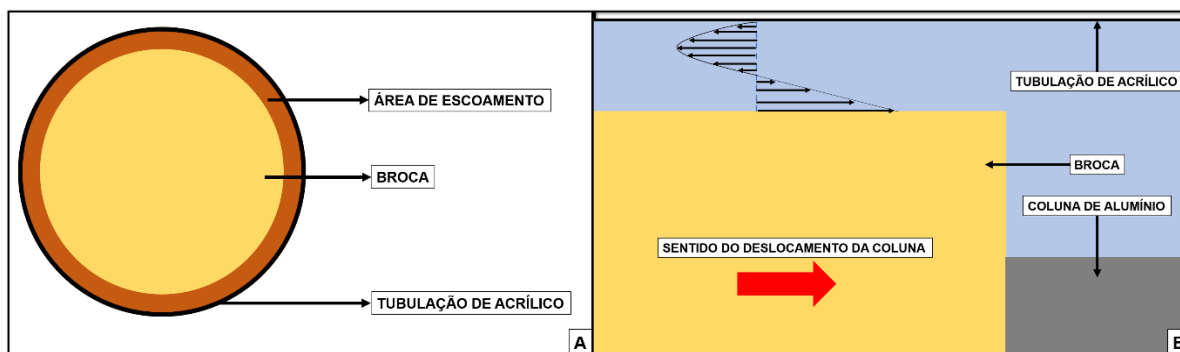


Figura 4.16 – Corte transversal e longitudinal da seção de testes: (a) área de escoamento do fluido e dos cascalhos (b) perfil de velocidades na região superior da broca. Autoria própria.

Por fim, os resultados obtidos para a broca do tipo 2 apresentaram a redução da extensão do plugue com o aumento da velocidade de translação da coluna, conforme indicado na Tabela 4.12. No entanto, este comportamento não significou redução do arrasto como observado nos testes realizados com a broca do tipo 1. Dessa forma, concluiu-se que a diferença de geometria das brocas pode ter alterado de maneira significativa o escoamento dentro da tubulação de acrílico, modificando assim as forças atuantes sobre o conjunto coluna/broca.

$V_T$ [cm/s]	H [mm]	$L_P$ [cm]	$F_a$ [N]
10	90	21,0	60,0
20	90	12,7	95,0
30	90	9,1	137
40	90	10,0	207
50	90	9,1	275

Tabela 4.12 – Resultados dos testes de arrasto realizados com a broca do tipo 2 e altura H4.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliada experimentalmente a força de arrasto sobre uma coluna de perfuração parcialmente imersa em leito de cascalhos horizontal. A unidade experimental utilizada reproduz algumas características do escoamento de poços horizontais, sendo composta por 3 elementos principais: uma tubulação de acrílico, que representa as paredes do poço; um tubo de alumínio, que corresponde à coluna de perfuração; e, um elemento usinado em PP, que representa a broca. Este aparato permite simular o deslocamento de uma coluna de perfuração dentro do poço, conforme ocorre em uma operação de manobra. O teste consiste na movimentação axial da coluna de perfuração dentro da tubulação de acrílico, que se encontra preenchida pelo fluido de trabalho e pelo leito de cascalhos, de altura constante. Ademais, a unidade experimental propicia o controle da velocidade de translação e rotação da coluna, bem como o monitoramento da força de tração aplicada sobre esta.

De acordo com a pesquisa bibliográfica realizada, a modelagem do arrasto não analisa de forma individualizada a interação entre o leito de cascalhos e a coluna de perfuração, negligenciando assim o aumento do arrasto causado por este fenômeno. Além disso, apenas um estudo experimental correlato foi encontrado, conforme descrito por RASI (1994). No entanto, o autor não disponibiliza uma descrição detalhada dos parâmetros verificados nos experimentos, uma vez que a análise da força de arrasto não era o foco da pesquisa. Tendo isto em vista, o presente trabalho buscou estudar a influência de 3 variáveis sobre a força de arrasto: a altura do leito de cascalhos, a área transversal da broca e a velocidade de translação da coluna.

Nos experimentos realizados foi observado que o leito de cascalhos pode apresentar 3 comportamentos distintos. O primeiro se caracterizou pelo acúmulo de cascalhos junto à broca durante o deslocamento da coluna, o que representou uma força de arrasto desprezível sobre ela. No segundo comportamento foi identificado a formação de um plugue de cascalhos próximo à broca, o que gerou aumento significativo da força de arrasto. Nesses testes, o plugue atingiu um comprimento constante no regime permanente e não houve aprisionamento da coluna. No terceiro foi observado a formação do plugue junto à broca, mas o regime permanente não foi atingido, o que significa dizer que o plugue ganhou comprimento indefinidamente, ocasionando assim,

o aumento da força de arrasto até o instante do aprisionamento da coluna. Dessa forma, concluiu-se que o aumento do plugue de cascalhos resulta no incremento da força de arrasto.

Nos testes efetuados mediante a variação da altura do leito de cascalhos, foi constatado que o aumento desta variável ocasiona a elevação do comprimento do plugue e, conseqüentemente, da força de arrasto. A medida em que a altura de leito aumenta, o volume de sólidos que escoam através da área livre entre a broca e as paredes da tubulação de acrílico, também se eleva, o que dificulta o fluxo dos cascalhos e culmina no aumento do plugue.

Nos experimentos que avaliaram a influência da área transversal da broca sobre a força de arrasto, foi observado que o aumento deste parâmetro eleva a força de tração sobre a coluna. Neste caso, o aumento do plugue se deu pela diminuição da área transversal livre por onde escoam os cascalhos.

Nos ensaios executados mediante a variação da velocidade de translação, foi verificado que o aumento deste parâmetro eleva a vazão de escoamento do fluido através da área livre, o que melhora a capacidade do fluido em carrear os cascalhos por esta região, proporcionando assim a redução do plugue e, na maioria dos casos, a diminuição do arrasto.

Os resultados obtidos indicaram que a magnitude da força de arrasto está relacionada ao comprimento do plugue de cascalhos e que esta pode ser desmembrada em duas componentes, uma referente ao atrito entre o plugue e as paredes do poço e a outra relacionada à diferença de pressão entre as extremidades do plugue, gerada pelo fenômeno de escoamento de fluidos em meios porosos.

### **5.1. Sugestões para trabalhos futuros**

O presente trabalho englobou as etapas de planejamento e construção da unidade experimental destinada ao estudo da força de arrasto sobre uma coluna de perfuração. Além disso, foi criada uma metodologia para a realização dos testes e os primeiros resultados foram apresentados. Com base na experiência adquirida, são apresentadas melhorias ao aparato experimental, bem como sugestões para trabalhos futuros:



- a) Fabricar tampas em acrílico para as escotilhas. Essa melhoria vai extinguir o aumento da força de tração aplicada sobre a coluna decorrente do contato entre a broca e as tampas;
- b) Equipar a unidade experimental com uma célula de carga de capacidade nominal de 1000 N. Dessa forma, será possível ampliar a análise para cenários que imponham maior resistência ao movimento da coluna;
- c) Criar uma abertura na tubulação de acrílico na extremidade do flange de aço inox que possui a vedação com a coluna de alumínio. Dessa forma, será possível reproduzir o escoamento pelo anular, conforme ocorre em um poço de petróleo;
- d) Instalar transdutores de pressão ao longo da tubulação de acrílico, permitindo assim analisar variações de pressão causadas pelo deslocamento do plugue de cascalhos;
- e) Utilizar cascalhos distintos para a formação do leito. Dessa forma, pode-se avaliar a influência da granulometria e da densidade dos cascalhos sobre a força de arrasto;
- f) Analisar a influência da excentricidade da coluna sobre a força de arrasto;
- g) Adaptar a unidade experimental para possibilitar a inclinação da mesma, tornando possível avaliar a influência deste parâmetro sobre a força de arrasto;
- h) Utilizar uma gama maior de fluidos com o intuito de analisar a influência de parâmetros reológicos sobre a força de arrasto;

## REFERÊNCIAS

AADNOY, B. S.; DJURHUUS, J. In IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, 25 - 27 August, 2008.

AADNØY, B. S.; STAVANGER, U.; ANDERSEN, K. **Friction Analysis for Long-Reach Wells**. In 1998 IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, 3 - 6 March, 1998.

ASTON, M. S.; HEARN, P. J.; MCGHEE, G. **Techniques for Solving Torque and Drag Problems in Today's Drilling Environment**. In 1998 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 27-30 September, 1998.

BRETT, J. F.; BECKETT, A. D.; HOLT, C. A.; SMITH, D. L. **Uses and Limitations of Drillstring Tension and Torque Models for Monitoring Hole Conditions**. In 1987 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, 27-30 September, 1987.

CHILD, A. J.; WARD, A. L. **The Refinement of a Drillstring Simulator: Its Validation and Applications**. In 63<sup>rd</sup> Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Houston, TX, October 2-5, 1988.

COSTA, S. S. **Modelagem para o Escoamento Transiente Horizontal e Quase Horizontal na Perfuração de Poços de Petróleo**. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, Brasil, Fevereiro, 2006.

GAYNOR, T.; HAMER, D.; CHEN, D. C-K.; SUN, S.; STUART, D. **Quantifying Tortuosities by Friction Factors in Torque and Drag Model**. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Santo Antonio, Texas, 29 September - 2 October, 2002.

HO, H-S. **An Improved Modeling Program for Computing the Torque and Drag in Directional and Deep Wells**. In 63<sup>rd</sup> Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Houston, TX, 2-5 October, 1988.

JOHANCSIK, C. A.; FRIESEN, D. B.; DAWSON, R. **Torque and Drag in Directional Wells - Prediction and Measurement**. In 1983 IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, 20-23 February, 1983.

MAIDLA, E. E.; WOJTANOWICZ, A. K. **Field Comparison of 2-D and 3-D Methods for the Borehole Friction Evaluation in Directional Wells**. In 62<sup>nd</sup> Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, TX, 27-30

September, 1987.

MCCORMICK, J. E.; CHIU, T. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, 30 October - 2 November, 2011.

MITCHELL, R. F. **Drillstring Solutions Improve the Torque-Drag Model.** In 2008 IADC/SPE Drilling Conference, Orlando, Florida, U.S.A, 4 - 6 March, 2008.

MITCHELL, R. F.; SAMUEL, R. **How Good is Torque-Drag Model?.** In 2007 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands, 20-22 February, 2007.

PLASLAY, P. R. **Stress Analysis of Drillstrings.** In University of Tulsa Centennial Petroleum Engineering Symposium, Tulsa, OK, U.S.A, 29 - 31 August, 1994.

RAE, G.; LESSO, W. G.; SAPIJANSKAS, M. **Understanding Torque and Drag: Best Practices and Lessons Learnt from the Captain Field's Extended Reach Wells.** In SPE/IADC Drilling Conference, 2005, Amsterdam, The Netherlands, 23-25 February.

RASI, M. **Hole Cleaning in Large, High-Angle Wellbores.** In 1994 IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, 15 - 18 February, 1994.

ROCHA, L. A. S.; AZUAGA, D.; ANDRADE, R.; VIEIRA, J. L. B.; SANTOS, O. L. A. **Perfuração Direcional**, 3ª edição, 2011.

SHEPPARD, M. C.; WICK, C.; BURGESS, T. **Designing Well Paths to Reduce Drag and Torque.** In 1986 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 5-8 October, 1986.

SIFFERMAN, T. R.; BECKER, T. E. **Hole Cleaning in Full-Scale Inclined Wellbores.** In 1990 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 23-26 September, 1990.

TIKHONOV, V.; VALIULLIN, K.; NURGALEEV, A.; RING, L.; GANDIKOTA, R.; CHAGUINE, P.; CHEATHAM, C. **Dynamic Model for Stiff String Torque and Drag.** In SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 5 - 7 March, 2013.

## A. VERIFICAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

A seguir é detalhada a etapa de verificação da unidade experimental, que tem o objetivo de conferir o funcionamento da célula de carga e a repetibilidade dos resultados obtidos por este equipamento. O procedimento de verificação é realizado para as seguintes etapas:

- i. Verificação da calibração da célula de carga;
- ii. Verificação da célula de carga acoplada à unidade experimental;

A determinação de uma grandeza física experimental deve ser realizada através da medição. O resultado do mensurando é sempre uma aproximação para o valor verdadeiro desta grandeza e deve ser o mais próximo possível desse valor. Dessa forma, define-se a incerteza no melhor valor  $y$  como uma indicação de quanto este melhor valor pode diferir do valor verdadeiro do mensurando, em termos de probabilidades, segundo VUOLO (1996).

No presente trabalho, a indicação da incerteza no processo de medição será realizada considerando a incerteza padrão ( $\sigma_P$ ), que pode ser definida como o desvio padrão da distribuição de erros. Para que isso seja possível é necessário saber fazer distinção entre erros estatísticos e sistemáticos. O primeiro consiste em um erro tal que os  $n$  resultados se distribuem de maneira aleatória em torno do valor verdadeiro (na ausência do erro sistemático). Conforme o número de repetições da medição aumenta indefinidamente, o valor médio se aproxima do valor verdadeiro da grandeza. Já o erro sistemático é sempre o mesmo nos  $n$  resultados, ou seja, quando existe apenas este erro, os resultados são iguais e a diferença para o valor verdadeiro é sempre a mesma, de acordo com VUOLO (1996). Neste trabalho foi considerado um único erro sistemático, que decorre da calibração da célula de carga.

Dessa forma, a incerteza expandida ( $U_{TM}$ ) foi calculada mediante as seguintes etapas:

- 1) Cálculo do valor médio, definido pela Equação A.1;
- 2) Cálculo de desvio padrão de acordo com a Equação A.2;

- 3) Cálculo da incerteza padrão aleatória por meio da Equação A.3;
- 4) Cálculo do erro sistemático através da Equação A.4;
- 5) Cálculo da incerteza expandida, definido pela Equação A.5;

$$T_M = \frac{T_{M1} + T_{M2} + T_{M3} + \dots + T_n}{n} \quad (A.1)$$

$$s_{T_M} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_{Mi} - T_M)^2} \quad (A.2)$$

$$s_{\overline{T_M}} = \frac{s_{T_M}}{\sqrt{n}} \quad (A.3)$$

$$b_{T_M} = \frac{CP}{100} \cdot 750 \quad (A.4)$$

$$U_{T_M} = 2 \sqrt{b_{T_M}^2 + s_{\overline{T_M}}^2} \quad (A.5)$$