



RIO

PUC

Dissertação de Mestrado

Perfilagem acústica de poços pela coluna de produção: Desenvolvimento de ferramenta conceitual e bancada para testes experimentais

Bruno Lima Davico de São João

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Centro Técnico Científico
Departamento de Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro, 28 de maio de 2025



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

Dissertação de Mestrado

Perfilagem acústica de poços pela coluna de produção:

Desenvolvimento de ferramenta
conceitual e bancada para testes
experimentais

Bruno Lima Davico de São João

Orientação: Prof. Dr. Arthur Martins Barbosa Braga

Coorientação: Dr. Luis Paulo Brasil de Souza

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Mecânica pelo programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, no Departamento de
Engenharia Mecânica.

Rio de Janeiro, 28 de maio de 2025



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

Perfilagem acústica de poços pela coluna de produção:

Desenvolvimento de ferramenta conceitual e
bancada para testes experimentais

Bruno Lima Davico de São João

**Dissertação apresentada como requisito parcial para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Aprovada pela Comissão examinadora abaixo:**

Prof. Dr. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Luis Paulo Brasil de Souza

Co-Orientador

Ouronova

Prof. Dr. Alan Conci Kubrusly

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Dr. Igor Braga de Paula

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de maio de 2025



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

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

Bruno Lima Davico de São João

Graduou-se em Engenharia Mecânica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ) em 2019. Tem experiência nas áreas de Petróleo e Gás e gerenciamento de projetos. Atua em projetos de pesquisa e desenvolvimento voltado para Petróleo e Gás e Energias desde 2018.

Ficha Catalográfica

João, Bruno Lima Davico de São

Perfilagem acústica de poços pela coluna de produção : desenvolvimento de ferramenta conceitual e bancada para testes experimentais / Bruno Lima Davico de São João ; orientação: Arthur Martins Barbosa Braga ; coorientação: Luis Paulo Brasil de Souza. – 2025.

147 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2025.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Perfilagem acústica. 3. Avaliação da integridade da camada de cimento de poços. 4. Tamponamento e abandono de poços. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Souza, Luis Paulo Brasil de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

À minha família.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Dr. Arthur Martins Barbosa Braga e ao meu coorientador Luis Paulo Brasil de Souza.

Um agradecimento muito especial à minha amada mãe, Rosemary, meu pilar, que não apenas me apoia e sustenta, mas vive cada um dos meus sonhos com uma intensidade ímpar. E para minhas avós Dilma e Maria Mathildes, pela participação essencial em minha criação e por terem sido cruciais na formação de quem sou hoje. Ao meu pai, Sergio, que faz e sempre fará falta entre nós, todo o meu amor e eterna saudade.

À minha namorada, Thais, que é meu suporte, refúgio de calma e fonte de afeto, especialmente nos momentos mais desafiadores deste percurso.

À PUC-Rio pela bolsa de isenção de mensalidades do doutorado e estrutura acadêmica.

À REPSOL SINOPEC Brasil pelo apoio financeiro do projeto TTiLT.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

João, Bruno Lima Davico de São; Braga, Arthur Martins Barbosa; Souza, Luis Paulo Brasil. **Perfilagem acústica de poços pela coluna de produção: Desenvolvimento de ferramenta conceitual e bancada para testes experimentais.** Rio de Janeiro, 2025. 147p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A busca por maior eficiência, redução de custos e mitigação de riscos constitui pilares fundamentais na indústria de Petróleo e Gás. Nesse contexto, o tamponamento e abandono permanente de poços petrolíferos é uma etapa operacional mandatória, de alta relevância técnica e ambiental, que impõe significativos desafios técnicos e econômicos ao setor. Conforme regulamentação da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, a efetivação do abandono permanente requer a existência de, no mínimo, dois Conjuntos de Barreiras Solidárias, sendo a interface entre o revestimento e o cimento um componente crucial de uma dessas barreiras. Um desafio particular desta fase reside na avaliação da integridade da cimentação do poço através da coluna de produção. Superar essa dificuldade permite enorme economia de custos e tempo, redução significativa de riscos operacionais e minimização da interrupção ou perda de produção.

Diante desse cenário, esta dissertação detalha o projeto e a construção de uma bancada de testes laboratoriais. A bancada de testes foi projetada para mimetizar os principais tipos de defeitos encontrados na cimentação de poços reais, permitindo também inserir níveis de excentricidade da coluna de produção em relação ao revestimento. Adicionalmente, é apresentado um protótipo de ferramenta de perfilagem acústica *through-tubing*, concebido com características análogas às ferramentas comerciais. Este protótipo foi empregado em ensaios na bancada experimental para investigar a viabilidade técnica da avaliação da qualidade da cimentação por meio da coluna de produção.

Palavras-Chave

Perfilagem acústica; Integridade de poços; Tamponamento e abandono de poços.

Abstract

João, Bruno Lima Davico de São; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor); Souza, Luis Paulo Brasil (Co-Advisor). **Through-tubing acoustic logging: Development of a conceptual tool and a laboratory bench for experimental Tests**. Rio de Janeiro, 2025. 147p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The pursuit of enhanced efficiency, cost optimization, and risk mitigation represents foundational objectives within the Oil and Gas industry. In this context, the permanent plugging and abandonment of petroleum wells is a mandatory operational phase of considerable technical and environmental significance, presenting substantial technical and economic challenges to the industry. As stipulated by regulations from the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels, the execution of permanent abandonment necessitates the establishment of a minimum of two Well Barrier Elements, wherein the casing-cement interface is a critical constituent of one such barrier. A specific challenge inherent to this phase pertains to the integrity assessment of the well's cementation via the production string (through-tubing logging). Overcoming this difficulty allows for enormous cost and time savings, significant reduction of operational risks, and minimization of production interruption or loss.

In light of this, the present dissertation elucidates the design, development, and construction of a laboratory-scale experimental apparatus. This setup was engineered to simulate the main types of defects found in the cementation of operational wells, further enabling the controlled variation of production string (tubing) eccentricity relative to the casing. Furthermore, a prototype acoustic logging instrument is introduced, designed with specifications analogous to those of commercial-grade tools. This prototype is intended for deployment in a series of tests conducted on the experimental apparatus to ascertain the technical viability of cement quality evaluation through the production string.

Keywords

Acoustic logging; Well integrity; Well plugging and abandonment.

Sumário

1	Introdução	20
1.1	Contexto e motivação	20
1.2	Abandono de poços de petróleo	22
1.2.1	Regulamentação e legislação	22
1.2.2	Custos envolvidos no abandono e desafios técnicos e operacionais	24
1.3	Justificativa e relevância do trabalho	26
1.4	Objetivo geral	27
1.5	Objetivos específicos	28
1.6	Organização da tese	28
2	Revisão bibliográfica	30
2.1	Princípios da perfilagem acústica para avaliação de cimentação em poços de petróleo	30
2.1.1	Fundamentos de propagação de ondas acústicas	32
2.1.2	Interação onda-estrutura no poço	33
2.1.3	Modelagem da propagação em múltiplas camadas cilíndricas	36
2.2	Métodos de perfilagem acústica para avaliação do cimento	37
2.3	Propagação de ondas acústicas em geometrias de poços complexas	42
2.3.1	Desafio da perfilagem através da coluna de produção	42
2.4	Soluções de pesquisa e comerciais	48
2.5	Cimentação de poços e tipos de defeitos	49
2.6	Aspectos estruturais e dimensionamento mecânico da bancada de testes	51
2.7	Bancadas de testes experimentais para simulação de poços	54
3	Metodologia da construção da bancada de testes e protótipo de ferramenta	59
3.1	Visão global do conjunto experimental	59

3.2	Bancada de teste	61
3.2.1	Fabricação do <i>setup</i> de testes	66
3.3	Montagem do setup	85
3.4	Protótipos funcionais de ferramentas de perfilagem <i>through tubing</i>	89
3.4.1	Sistemas do protótipo de ferramenta	92
3.4.2	Protótipo 1	96
3.4.3	Protótipo 2	104
4	Resultados	108
4.1	Cimentação	108
4.1.1	Processo de vazamento do cimento e desafios	108
4.1.2	Cimentação – Boa Qualidade	110
4.1.3	Cimentação – Canalização	113
4.1.4	Cimentação – Canalização/Vazio/Microanular	115
4.2	Ensaio realizado na bancada de testes	118
4.2.1	Dificuldades encontradas na montagem	119
4.2.2	Integração setup de teste – Ferramenta	119
4.2.3	Especificações de teste	121
4.2.4	Preenchimento da bancada com fluido e testes de estanqueidade	123
4.2.5	Testes preliminares de configuração	125
4.2.6	Testes de validação sem cimento	127
4.2.7	Testes de validação com cimento	131
4.3	Protótipos	131
4.3.1	Protótipo 1	131
4.3.2	Protótipo 2	133
4.4	Dados obtidos – Experimentos	135
5	Conclusão	139
6	Bibliografia	141

Lista de figuras

Figura 1: Ciclo de vida de um campo [2].	21
Figura 2: Conjunto de barreira solidária [11].	23
Figura 3: Estimativa de investimento em descomissionamento [13].	25
Figura 4: Estimativa de investimento em abandono [13].	25
Figura 5 - Representativo da seção transversal de um poço [16].	36
Figura 6 - Esquemático da técnica pitch-catch. O sinal acústico é gerado pelo transmissor (T) e captados pelos receptores (R) [17].	38
Figura 7: Gráfico CBL/VDL [35].	40
Figura 8 - Ilustração do princípio pulso-eco. Adaptado de [17].	42
Figura 9: Camadas do poço de petróleo [21].	44
Figura 10 - Excentricidade do <i>tubing</i> em relação ao <i>casing</i> [17].	45
Figura 11 - Representação de ferramenta excêntrica [17].	46
Figura 12: Dimensões totais da bancada de teste.	62
Figura 13: Posicionamento da ferramenta de perfilagem na bancada de teste.	63
Figura 14: Arranjo de configurações [54].	65
Figura 15: Excentricidades e dimensões dos <i>casings</i> .	66
Figura 16: Tubos no laboratório.	69
Figura 17: Ilustração da base de sustentação com acesso na sua parte inferior.	70
Figura 18: Forças e reações atuantes na bancada	71
Figura 19: Fixação da bancada de teste na base.	73
Figura 20: Montagem do cap inferior - Plug Inferior - Conjunto de tubos.	74
Figura 21: Cálculo da rosca do cap inferior/Superior e <i>outer casing</i> [56].	75
Figura 22: Dimensões básicas rosca <i>Stub Acme</i> [56].	76
Figura 23 – Fórmulas para determinação das dimensões limites [56].	77
Figura 24: Parâmetros geométricos fundamentais de roscas internas e externas, ilustrando as tolerâncias e folgas diametrais [56].	78
Figura 25: Representação esquemática das zonas de tolerância e folgas entre roscas externas e internas [56].	78
Figura 26: Plug inferior 7".	81

Figura 27: À esquerda o plug anular <i>outer casing</i> e à direita plug anular <i>casing</i> . Plug inferior 7".	82
Figura 28: Cap Superior. Plug inferior 7".	82
Figura 29: Sistema Tripé de sustentação do 2° protótipo. Plug inferior 7".	83
Figura 30: Sistema Tripé de sustentação do 2° protótipo. Plug inferior 7".	83
Figura 31: Motor de movimentação do 2° protótipo.	84
Figura 32: Conjunto de Polias 1° protótipo.	84
Figura 33: Munhão de içamento soldado no topo da bancada.	85
Figura 34: Detalhamento dos componentes do Setup	86
Figura 35: Conjunto <i>Plug - Tubing - Casing</i>	87
Figura 36: Centralização do <i>tubing</i> e inserção do plug superior intermediário	87
Figura 37: Içamento da bancada de teste	89
Figura 38: Análise de árvore de falhas da ferramenta <i>through tubing</i> .	91
Figura 39: Ilustração do sistema de excitação e leitura da bancada experimental [54].	92
Figura 40: Sistema de excitação e aquisição de dados [16].	95
Figura 41: Interface do software [16].	95
Figura 42: Vista esquemática do primeiro protótipo de ferramenta.	96
Figura 43: Parte superior da ferramenta.	96
Figura 44: Arranjo dos hidrofones.	97
Figura 45: Parte inferior da ferramenta.	97
Figura 46 - Montagem do sistema de movimentação dos hidrofones.	98
Figura 47: Integração parte superior e central da ferramenta.	98
Figura 48: Correia do 1° protótipo [61].	99
Figura 49: Dimensionamento do torque do motor [62].	100
Figura 50: Torque para a polia [61].	102
Figura 51: Posicionamento do motor no topo da ferramenta.	103
Figura 52: Primeiro protótipo de ferramenta.	103
Figura 53: Esquemático do novo protótipo de ferramenta	104
Figura 54: Arranjo fixo de hidrofones	106
Figura 55: Eletrônica embarcada do novo protótipo.	107
Figura 56: Moldes de papelão.	109

Figura 57: <i>Casing</i> 9 5/8" cimentado na vertical.	109
Figura 58: (a) Centralização e sustentação do papelão e (b) Vazamento do cimento	110
Figura 59: (a) Início do preenchimento de cimento e (b) Fixação do tubo	112
Figura 60: (a) Suporte da forma de papelão e b) Vista do tubo em processo de cura	112
Figura 61: (a) Trinca na parte superior do tubo e (b) Contenção da trinca	113
Figura 62: (a) Fixação do tubo com as mangueiras e (b) Vazamento do cimento	114
Figura 63: (a) Cura do tubo - <i>Channeling</i> e (b) Mangueira de 6mm	115
Figura 64: (a) Tubo com cimento homogêneo e (b) Ilustração das três mangueiras	115
Figura 65: Visualização da mangueira de 10mm e interface para centralização	117
Figura 66: (a) Preparação com plástico para simular microanular e (b) Homogeneidade do cimento	118
Figura 67: (a) Visualização da trinca na direção da mangueira ao logo do tubo e (b) Pedacos de cimento na parte superior do tubo	118
Figura 68: Inserção da ferramenta na bancada de teste	120
Figura 69: Vista do andaime.	121
Figura 70: Torneira e mangueira para preenchimento e escoamento de fluido	124
Figura 71: Furos de comunicação nos tubos	125
Figura 72 : Estrutura do teste preliminar	126
Figura 73: Disposição da ferramenta e eletrônica	127
Figura 74: Primeira configuração do teste sem cimento	128
Figura 75: Segunda configuração do teste sem cimento	129
Figura 76: Terceira configuração do teste sem cimento.	129
Figura 77: Quarta configuração do teste sem cimento.	130
Figura 78: Arranjos de 9 5/8".	130
Figura 79: Arranjos de 7".	130
Figura 80: Resultado do tubo sem cimento e sem tubing.	136
Figura 81: Resultado do tubo com boa cimentação e sem <i>tubing</i> .	136
Figura 82: Resultado do tubo com boa cimentação e com excentricidade média do <i>tubing</i>	137

Figura 83: Resultado do tubo com canalização e com *tubing* concêntrico.
138

Figura 84: Resultado do tubo com *channeling* e excentricidade média do *tubing*.
138

Lista de tabelas

Tabela 1: Parâmetros de medição.	31
Tabela 2: Configuração típica de poço para o trabalho da Ferramenta de Perfilagem <i>Through Tubing</i> .	60
Tabela 3: Requisitos de desempenho de ferramentas de perfilagem.	61
Tabela 4: Deslocamento percentual da excentricidade.	66
Tabela 5: Características dos tubos da bancada de teste.	68
Tabela 6: Parâmetros da bancada de teste.	71
Tabela 7: Parâmetros selecionados para fixação cap inferior - <i>outer casing</i> .	76
Tabela 8: Diâmetros básicos da rosca.	77
Tabela 9: Dimensões rosca cap inferior.	79
Tabela 10: Dimensões rosca <i>outer casing</i> .	79
Tabela 11: Lista dos componentes necessários para montagem do conjunto.	86
Tabela 12: Especificações do primeiro protótipo de ferramenta.	99
Tabela 13: Especificações do protótipo aperfeiçoado.	106

Lista de siglas e abreviações

ADC	Conversor Analógico-Digital (Analog-to-Digital Converter)
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	American Petroleum Institute
BI	Bond Index (Índice de Aderência)
BSEE	Bureau of Safety and Environmental Enforcement
CBL	Cement Bond Log (Perfil de Aderência do Cimento)
CCL	Casing Collar Locator (Localizador de Colar de Revestimento)
CSB	Conjunto Solidário de Barreiras
DAQ	Data Acquisition (Aquisição de Dados)
END	Ensaio Não Destrutivo
E&P	Exploração e Produção
FDTD	Finite-Difference Time-Domain
FEM	Finite Element Method (Método dos Elementos Finitos)
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FPSO	Floating Production, Storage and Offloading
FTA	Fault Tree Analysis (Análise de Árvore de Falhas)
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ML	Machine Learning (Aprendizado de Máquina)
MSE	Mean Squared Error (Erro Quadrático Médio)
NCSB	Notificação de Conjunto Solidário de Barreiras
O&G	Oil and Gas (Óleo e Gás)
P&A	Plug and Abandonment (Tamponamento e Abandono)
SGIP	Sistema de Gerenciamento da Integridade de Poços
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído)
TT	Through-tubing (Através da coluna de produção)
USIT	Ultrasonic Imager Tool
VDL	Variable Density Log (Perfil de Densidade Variável)

Lista de símbolos

a	Aceleração vetorial
A_{proj}	Área projetada de contato entre filetes de rosca
A_S	Área de seção resistente do parafuso
b	Largura da correia
d	Distância perpendicular ou braço de alavanca
d	Deslocamento do eixo central (excentricidade)
D	Diâmetro básico maior e tamanho nominal (rosca)
D_1	Diâmetro externo do tubing
D_2	Diâmetro interno do casing / Diâmetro primitivo básico
D_e	Diâmetro externo da polia
D_m	Diâmetro médio da rosca
D_p	Diâmetro primitivo da polia
$e\%$	Excentricidade relativa percentual
E	Módulo de Elasticidade
f	Frequência
F	Força resultante
F_{axial}	Força axial total
F_{eq}	Força axial equivalente
F_L	Força lateral aplicada
G	Módulo de Cisalhamento
h	Altura do filete da rosca
i	Relação de redução de transmissão
k	Número de onda
L_B	Largura da base
L_e	Comprimento de engajamento da rosca
m	Massa do corpo
M	Momento ou Torque
N_d	Número de dentes da polia
p	Passo da rosca
P	Passo da correia ou rosca
P_T	Peso total do conjunto

R	Coeficiente de reflexão de amplitude
R_{linear}	Resolução linear do sistema de movimentação
T	Coeficiente de transmissão
T_{adm}	Torque admissível da correia
T_L	Torque de carga
T_m	Torque motor
v	Velocidade de deslocamento linear
v_P	Velocidade das ondas compressivas (ondas P)
v_S	Velocidade das ondas cisalhantes (ondas S)
Z	Impedância acústica
α	Ângulo de passo do motor
Δt	Tempo de trânsito da onda acústica
η	Eficiência da transmissão mecânica
λ	Comprimento de onda
ν	Razão de Poisson
ρ	Densidade do material
σ	Tensão normal de tração axial
σ_b	Pressão média de contato nos flancos da rosca
σ_{eq}	Tensão equivalente de Von Mises
τ	Tensão de cisalhamento transversal
ω	Rotação / Velocidade angular

1

Introdução

1.1

Contexto e motivação

A indústria de Óleo e Gás (O&G, do inglês *Oil and Gas*) desempenha um papel central na matriz energética global e na economia mundial, fornecendo recursos essenciais para transporte, geração de energia e produção de inúmeros bens de consumo. A exploração e produção (E&P, do inglês *Exploration and Production*) de hidrocarbonetos envolvem um ciclo de vida complexo para cada poço perfurado, conforme ilustrado na Figura 1. Este ciclo inicia-se com a fase de exploração, onde áreas potenciais são avaliadas geológica e geofisicamente, culminando na perfuração de poços exploratórios para confirmar a presença de hidrocarbonetos no local investigado [1]. Posteriormente, segue-se a fase de avaliação/delineamento, na qual poços adicionais são perfurados para determinar a extensão e a viabilidade comercial do reservatório descoberto. Após a confirmação da viabilidade, inicia-se a fase de desenvolvimento, com a perfuração de múltiplos poços de produção e injeção, e a instalação da infraestrutura de superfície necessária. A fase de produção é então estabelecida, frequentemente caracterizada por um período inicial de produção em platô, limitado pela capacidade das instalações, seguido por uma fase de declínio, à medida que a pressão do reservatório diminui. Durante esta fase, diversas técnicas podem ser empregadas para otimizar ou estender a produção, como *workovers*, estimulação, elevação artificial e recuperação secundária/terciária [1].

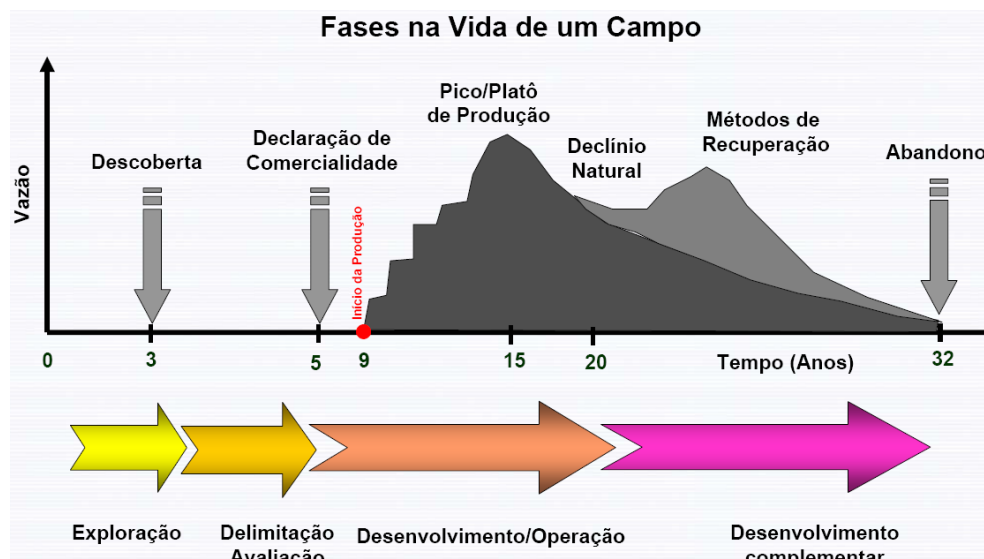


Figura 1: Ciclo de vida de um campo [2].

Inevitavelmente, todo poço atinge um ponto onde a produção deixa de ser economicamente viável. Neste momento, inicia-se a fase final e crucial do ciclo de vida: o abandono. Esta fase, também conhecida como tamponamento e abandono P&A (do inglês *Plug and Abandonment*), envolve a selagem permanente e segura do poço para prevenir impactos ambientais e garantir a integridade a longo prazo. A importância do P&A tem crescido significativamente nas últimas décadas devido ao envelhecimento da infraestrutura de produção em bacias maduras, bacia sedimentar que já foi extensivamente explorada por muitos anos e tem grande parte de seus recursos mais facilmente recuperáveis já produzidos, ao redor do mundo, como o Mar do Norte e o Golfo do México [3]. Este cenário também se torna cada vez mais relevante no Brasil, com um número crescente de poços atingindo o fim de sua vida útil [4].

A integridade de poços é de suma importância na indústria de petróleo e gás, sendo a cimentação um componente fundamental para garantir o isolamento zonal, impedindo a migração indesejada de fluidos (óleo, gás, água) entre diferentes formações geológicas ou para a superfície, e o suporte mecânico dos revestimentos, chamados de *casing*, com a formação, elementos que fazem parte da estrutura do poço. Assegurar a integridade da camada de cimento atrás dos revestimentos de poços é uma tarefa que apresenta desafios significativos, especialmente em poços envelhecidos e formações geológicas complexas [5]. Falhas nesse isolamento podem levar a problemas operacionais, riscos ambientais e perdas econômicas significativas. Sendo assim, a necessidade de métodos precisos e confiáveis para

avaliar a qualidade do cimento é crescente. Um desafio específico desse processo reside na avaliação da qualidade do cimento através da coluna de produção, chamada de *tubing*, onde a presença da tubulação interna pode dificultar as medições acústicas, interferindo diretamente na propagação das ondas emitidas [6].

Essa avaliação geralmente depende do uso de ferramentas de perfilagem acústica que, predominantemente, apresentam maior eficácia em poços onde a coluna de produção foi removida. No entanto, particularmente para operações de P&A em poços submarinos (*offshore*), a remoção da coluna de produção é uma operação custosa e vagarosa, e que deve ser evitada sempre que possível. Mediante a elevada demanda e as oportunidades de redução de custo e riscos operacionais, a indústria tem investido significativamente em projetos de pesquisa e desenvolvimento focados na integridade de poços, avaliação de cimento e perfilagem acústica. Apesar disso, a tecnologia comercial para inspeção da integridade do cimento através da coluna de produção ainda não se encontra totalmente estabelecida [7].

Considerando este cenário, torna-se fundamental a criação de uma bancada de testes em escala laboratorial, porque ensaios em poços reais implicam em custos elevados e enfrentam notórias dificuldades de acesso junto às empresas detentoras, devido aos inerentes riscos operacionais, ambientais e de segurança.

1.2

Abandono de poços de petróleo

1.2.1

Regulamentação e legislação

No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é a entidade responsável por regular e fiscalizar as atividades de E&P, incluindo os procedimentos de abandono de poços. Um marco regulatório fundamental é a Resolução ANP nº 46/2016 de 1º de novembro de 2016, que instituiu o Regulamento Técnico do Sistema de Gerenciamento da Integridade de Poços (SGIP) [8]. O SGIP estabelece requisitos e práticas de gestão para garantir a segurança operacional e a integridade dos poços durante todo o seu ciclo de vida, desde o projeto até o abandono. Dentre os requisitos publicados nas “Diretrizes para

Abandono de Poços”, cabe destacar a necessidade de estabelecer barreiras de segurança robustas e verificadas. O conceito de Conjunto Solidário de Barreira (CSB) é definido como um conjunto de um ou mais elementos de barreira (como cimento, tampões mecânicos, formação impermeável, revestimento cimentado) que, atuando em conjunto, impedem o fluxo não intencional de fluidos para o meio externo ou entre formações não conectadas naturalmente [9] [10]. Para o abandono permanente, a resolução exige, no mínimo, duas barreiras permanentes independentes, sendo uma delas a interface entre o revestimento e o cimento, conforme mostrado na Figura 2.

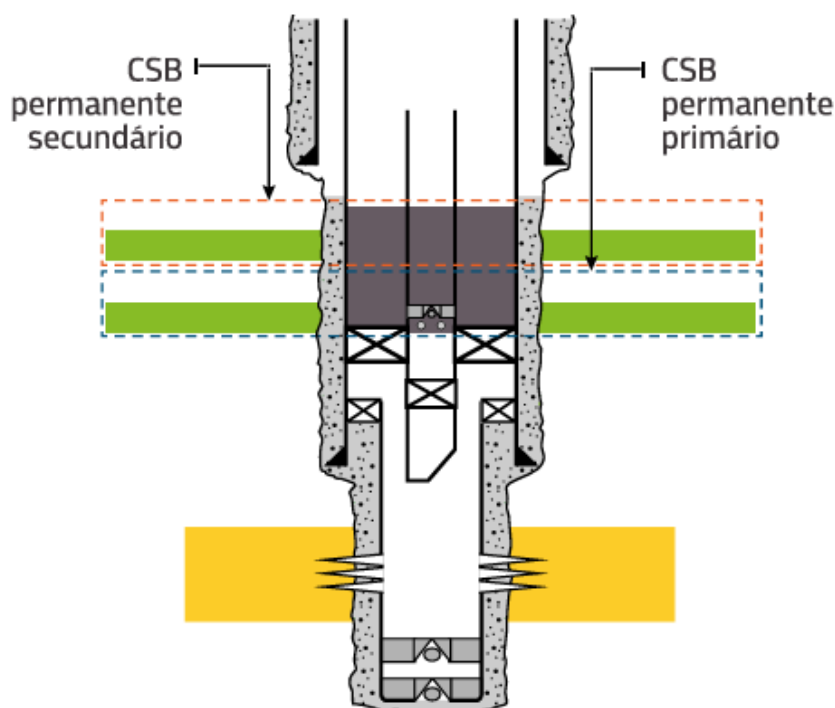


Figura 2: Conjunto de barreira solidária [11].

A Resolução ANP nº 699/2017 de 6 de setembro de 2017 detalha os procedimentos para envio de dados de integridade à ANP, incluindo a Notificação de Conjunto Solidário de Barreiras (NCSB) [9]. Recentemente, a resolução ANP nº 817/2020 de 24 de abril de 2020 estabeleceu o regulamento técnico para o descomissionamento de instalações, abrangendo o abandono de poços e a remoção de estruturas e definem prazos e procedimentos específicos para a submissão e aprovação de projetos de abandono [9] [10].

É relevante notar que este enfoque em múltiplas barreiras verificadas é consistente com as práticas e regulamentações internacionais. Normas como a NORSOK D-010 (Noruega) [12], as diretrizes da *Oil & Gas* UK (Reino Unido)

[13] e a regulamentação do *Bureau of Safety and Environmental Enforcement* (BSEE) [14] nos Estados Unidos também prescrevem a instalação e verificação de, no mínimo, duas barreiras independentes para o abandono seguro de poços, embora existam variações nos comprimentos mínimos recomendados para tampões de cimento e nos métodos de verificação específicos exigidos.

Os materiais utilizados como elementos de barreira, tipicamente cimento Portland ou materiais alternativos de desempenho similar, devem atender a critérios rigorosos de impermeabilidade, durabilidade a longo prazo, resistência química aos fluidos de formação, propriedades mecânicas adequadas, ausência de retração significativa e boa aderência às superfícies adjacentes, seja revestimento ou formação [3] [8] [15]. Tão importante quanto a instalação das barreiras é a sua verificação. O SGIP determina que a integridade de cada barreira estabelecida deve ser verificada, preferencialmente através de testes de pressão (positivos ou negativos) que simulem o diferencial de pressão esperado. Em casos em que o teste não é factível, a verificação por confirmação, por exemplo, através de perfilagem acústica para avaliar a qualidade do tampão de cimento ou a presença de um tampão mecânico pode ser aceita, desde que tecnicamente justificada [4].

1.2.2

Custos envolvidos no abandono e desafios técnicos e operacionais

Apesar dos avanços regulatórios e técnicos, o P&A continua sendo uma operação complexa e onerosa. Os custos associados ao abandono, especialmente em ambientes *offshore* de águas profundas, podem ser extremamente elevados, representando uma parcela significativa do custo total do ciclo de vida de um campo [16]. Além dos custos, existem desafios técnicos consideráveis, como garantir a qualidade da cimentação em condições adversas, remover equipamentos submarinos complexos e, eventualmente da plataforma, e assegurar a integridade das barreiras por longos períodos [17]. A necessidade de cumprir regulamentações rigorosas como a resolução ANP 46/2016, que exige a verificação das barreiras de abandono, impõe uma pressão adicional sobre as operadoras para desenvolverem métodos eficientes e econômicos de avaliação da integridade do poço, o que, por sua vez, impulsiona a busca por desenvolvimento de tecnologias inovadoras, como a abordagem experimental proposta nesse trabalho.

Segundo a ANP, de 2025 a 2029, estão previstos R\$70,2 bilhões de investimentos em descomissionamento de instalações de E&P, conforme Figura 3, sendo R\$46,73 bilhões destinados para a atividade de abandono permanente, conforme Figura 4, existindo 3773 poços a serem descomissionados [16] [18].



Figura 3: Estimativa de investimento em descomissionamento [16].

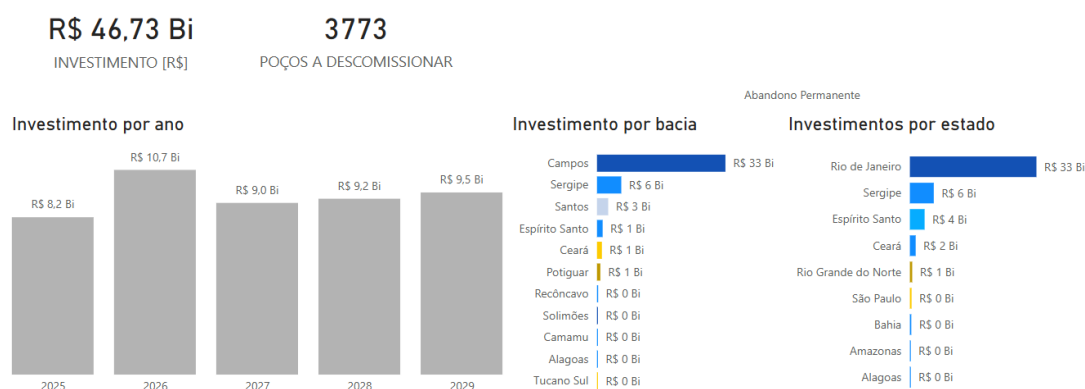


Figura 4: Estimativa de investimento em abandono [16].

Os desafios associados à perfilagem de cimento variam dependendo do tipo de poço e do ambiente. Poços terrestres (*onshore*) geralmente apresentam custos de intervenção menores e logística mais simples em comparação com poços marítimos. No ambiente *offshore* brasileiro, predominam campos em águas profundas e ultra profundas, lâminas d'água com profundidades superiores a 400 e 1.500 metros respectivamente, onde as operações são realizadas a partir de plataformas fixas, unidades flutuantes de produção como FPSOs (do inglês *Floating Production, Storage and Offloading*) ou sistemas submarinos. [16]

As principais limitações e desafios em operações de P&A *offshore* incluem:

- Profundidade da lâmina de água: Operações em águas profundas exigem embarcações e equipamentos especializados, aumentando a complexidade e os custos.
- Condições ambientais: condições meteorológicas e marítimas podem restringir as janelas operacionais.
- Logística complexa: Mobilização de pessoal, equipamentos e materiais para locais remotos.
- Custos elevados: O descomissionamento de instalações *offshore* e o abandono de poços representam um passivo financeiro significativo para as operadoras, ocorrendo em uma fase em que o campo já não gera receita. A incerteza na estimativa desses custos é um desafio econômico [17].
- Integridade das barreiras: A confirmação da integridade das barreiras de cimento em poços antigos ou que sofreram condições operacionais severas é tecnicamente desafiadora.
- Remoção vs. abandono no local: Decisões sobre a remoção completa de estruturas submarinas versus o abandono no local envolvem considerações técnicas, ambientais e econômicas complexas.
- Regulamentação: O cumprimento de rigorosas normas ambientais e de segurança, bem como a necessidade de obter aprovações de diversos órgãos - como a ANP, o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) e a Marinha - adiciona uma camada significativa de complexidade administrativa.

1.3

Justificativa e relevância do trabalho

Apesar dos desafios intrínsecos detalhados, a capacidade de realizar a perfilagem acústica através da coluna de produção é um tema em constante desenvolvimento para a indústria de O&G. A otimização das operações de P&A permanente, a redução de custos associados à intervenção em poços e a possibilidade de monitoramento contínuo da integridade das barreiras de cimento ao longo do tempo são motivadores poderosos para superar as dificuldades técnicas da perfilagem TT (do inglês *through-tubing*).

Contudo, como exposto, ainda existe uma lacuna na confiabilidade da interpretação dos sinais acústicos que sofrem interações durante a propagação das ondas nas configurações TT. As abordagens convencionais de análise de sinais mostram-se insuficientes diante da sobreposição de eventos e da atenuação do sinal de interesse.

Considerando as dificuldades, a complexidade e os altos custos envolvidos nos testes diretos em poços de campo, a implementação de um setup onde são testadas ferramentas acústicas em laboratório apresenta-se como uma valiosa alternativa técnica. Essa plataforma possibilita um ambiente controlado, ideal para gerar conjuntos de dados confiáveis e representativos das diversas condições de interesse (como a qualidade da cimentação, tipos específicos de defeitos e variações na excentricidade dos componentes tubulares). Adicionalmente, ela possibilita validar modelos de simulação numérica da propagação de ondas, além de possibilitar o desenvolvimento, treinamento, teste e otimização de algoritmos de processamento de sinais e de Aprendizado de Máquina (ML, do inglês *Machine Learning*) antes de sua aplicação em campo. Dessa forma, a utilização de uma bancada experimental representa um avanço metodológico para a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias ou abordagens na investigação de poços.

Portanto, projetou-se e construiu-se uma bancada de testes em laboratório para facilitar a obtenção de dados de diversas configurações, reproduzindo os tipos de defeitos frequentemente encontrados em poços reais. Adicionalmente a bancada de testes, foi desenvolvido e fabricado dois protótipos de ferramenta de perfilagem. Os dados experimentais gerados pelos protótipos da ferramenta foram viabilizadores para outros trabalhos acadêmicos e serviram como base para a validação de modelos analíticos e numéricos, além de serem utilizados como insumo para processamentos com aprendizado de máquina, que não fazem parte do escopo desta dissertação.

1.4

Objetivo geral

O objetivo geral desta tese é o desenvolvimento e construção de uma bancada de testes experimentais em escala reduzida, que represente a geometria de um poço de petróleo real com coluna de produção e revestimento. A bancada deve permitir

a criação controlada de diferentes condições no anular externo, incluindo fluido, cimento de boa qualidade, cimento de baixa qualidade, ausência de cimento e canalizações, além de possibilitar a variação dos níveis de excentricidade da coluna de produção (configurações concêntrica, com excentricidade intermediária e com excentricidade máxima). O trabalho também contempla o desenvolvimento e construção de protótipo funcional de ferramenta de perfilagem acústica para avaliação da integridade do cimento através da coluna de produção.

1.5

Objetivos específicos

- Construção de uma bancada para testes experimentais,
- Construção de uma ferramenta acústica conceitual,
- Criar, de modo controlado, diferentes tipos de cenários na camada de cimento de poços de petróleo, como casos com e sem defeito.
- Testar o protótipo de ferramentas de perfilagem acústica para a avaliação da qualidade da cimentação através de múltiplas camadas.

1.6

Organização da tese

O presente capítulo introduz o cenário de abandono de poços no Brasil, abordando a legislação vigente, custos relacionados ao processo, bem como as dificuldades encontradas na operação de perfilagem acústica através da coluna de produção. O Capítulo 2 aborda a literatura existente sobre os métodos de perfilagem acústica, detalhando suas operações e funcionamento, contextualiza as principais características das ferramentas comerciais existentes no mercado, descreve os defeitos comumente encontrados na cimentação e aborda o cenário de bancadas de testes ressaltando o impacto de excentricidades. O Capítulo 3 descreve a metodologia empregada para o desenvolvimento e construção da bancada experimental e dos protótipos de ferramentas, apresentando também o sequencial dos testes realizados. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos testes em escala com o protótipo de ferramenta na bancada de teste. Por fim, o Capítulo 5 apresenta a conclusão, resumindo as principais contribuições, limitações,

verificando o atendimento aos objetivos e propondo trabalhos futuros. O Capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas.

2

Revisão bibliográfica

2.1

Princípios da perfilagem acústica para avaliação de cimentação em poços de petróleo

A perfilagem acústica, seja ela sônica ou ultrassônica, é um método de Ensaio Não Destrutivo (END) essencial para a avaliação da integridade do revestimento e da qualidade da cimentação. A técnica fundamenta-se na propagação e interação de ondas mecânicas em meios elásticos e fluidos, sendo o poço modelado como um guia de onda cilíndrico e estratificado [19] [20]. A avaliação da integridade da cimentação baseia-se na análise de como as propriedades físico-elásticas e a geometria das múltiplas camadas (fluido, aço, cimento, formação) alteram os parâmetros mensuráveis da onda acústica. A resposta acústica obtida nos receptores reflete o efeito da impedância acústica e da atenuação em cada interface [21].

A avaliação da integridade do poço é quantificada pela medição e análise de três parâmetros acústicos primários, cujas variações são induzidas pelas condições de contorno e pelas propriedades dos materiais, conforme Tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Parâmetros de medição.

Parâmetro	Definição Física	Relação com a Cimentação
Tempo de Trânsito	O tempo que a energia acústica leva para percorrer uma distância conhecida entre o transmissor e o receptor, ou o tempo de chegada de uma reflexão. [Wang et al., 2016].	Utilizado primariamente para calibração da velocidade dos tubulares e para localizar interfaces (ex: topo do cimento).
Amplitude	A magnitude máxima da perturbação (pico de pressão no fluido ou pico de deslocamento no sólido) do sinal registrado. [Wang et al., 2016].	No método Sônico (CBL), a baixa amplitude do primeiro ciclo da onda E1 indica boa cimentação (alta atenuação). No método Ultrassônico (USI), a alta amplitude do eco de retorno indica má cimentação (baixa transmissão/alta reflexão).
Atenuação	A taxa de decaimento ou perda de energia do sinal à medida que ele se propaga. É tipicamente medida em decibéis por unidade de comprimento (dB/m ou dB/ft) [Wang et al., 2016].	É a métrica central do método sônico (CBL). A atenuação da onda que viaja pelo revestimento é a prova física de que a energia está sendo dissipada no cimento e na formação.

2.1.1

Fundamentos de propagação de ondas acústicas

Ondas acústicas são ondas mecânicas que se propagam através de um meio (sólido, líquido ou gasoso) por meio da vibração de suas partículas. Em um contexto de poço de petróleo, o sistema é composto por múltiplos meios elásticos e fluidos, como aço (coluna de produção e revestimentos), cimento (sólido poroso), formação (rocha) e fluidos (água, óleo, lama) [5] [19].

2.1.1.1

Ondas de corpo (*Bulk waves*)

A propagação de ondas em um meio elástico infinito, homogêneo e isotrópico é regida pela equação da onda acústica. Essa equação admite a existência de duas soluções fundamentais de ondas de corpo, cujas velocidades são determinadas pelas propriedades elásticas do material (Módulo de Elasticidade E , Razão de Poisson ν) e sua densidade (ρ) [22] [5]:

- Ondas Compressivas (Ondas ρ): São ondas longitudinais, onde o movimento das partículas é paralelo à direção de propagação. São as ondas mais rápidas (*first arrival*, ou E1), sendo as primeiras a serem detectadas pelos receptores. Sua velocidade (v_p) é dada por:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

- Ondas Cisalhantes (Ondas S): São ondas transversais, onde o movimento das partículas é perpendicular à direção de propagação. Sua velocidade (v_s) é dada por:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}}$$

Onde G é o Módulo de Cisalhamento.

A propriedade fundamental que possibilita a avaliação do cimento é que fluidos ideais (como a água dentro do poço) não suportam tensões cisalhantes ($G = 0$), de modo que $v_s = 0$ e, portanto, ondas S não se propagam através deles [22]. Consequentemente, um cimento de boa qualidade (sólido) permite a propagação de ondas S; um fluido no anular (defeito de cimentação) não permite [5].

2.1.1.2

Ondas guiadas (*Guided waves*)

Em um poço, os componentes tubulares (revestimento e coluna de produção) são estruturas finitas (casca cilíndrica) imersas em fluidos e cimento. Nessas geometrias confinadas, as ondas de corpo (P e S), geradas pela fonte, não podem se propagar livremente [20].

- Formação de Modos: A energia da onda sofre múltiplas reflexões e conversões de modo nas fronteiras internas e externas da estrutura (ex: parede interna e externa do *casing*) [16].
- Onda Guiada: Uma onda guiada é um modo de propagação estável que surge da interferência construtiva dessas ondas P e S refletidas e convertidas. Elas se propagam axialmente ao longo da estrutura, enquanto estão confinadas transversalmente pelas fronteiras [23] [24].

Diferente das ondas de corpo (que têm velocidade fixa pelo material), a velocidade de uma onda guiada é dispersiva, ou seja, ela depende da frequência da onda e da geometria do guia (ex: espessura do *casing*). O sinal completo detectado na perfuração é uma superposição complexa desses modos guiados [17].

2.1.2

Interação onda-estrutura no poço

A avaliação da cimentação exige análise de como as ondas acústicas interagem nas múltiplas interfaces do poço. Esta interação é ditada pelos princípios de conservação de energia e pelas condições de contorno impostas pelas interfaces.

2.1.2.1

Condições de contorno e conversão de modo

Quando uma onda, seja P ou S, incide sobre a interface entre dois meios elásticos distintos (ex: aço-cimento), a onda se particiona, parte de sua energia é refletida e parte é transmitida [16]. Para meios elásticos em contato perfeito (sem escorregamento), a física da interação exige que, na interface, sejam satisfeitas as condições de continuidade de deslocamento e de tensões (normais e tangenciais) [23].

Para satisfazer simultaneamente essas condições de contorno, a onda incidente gera um conjunto de novas ondas [25] [26]. Esse fenômeno engloba:

- Reflexão: Parte da energia retorna ao meio de origem.
- Refração (ou Transmissão): Parte da energia é transmitida para o segundo meio, mudando sua direção de propagação conforme relaciona os ângulos de incidência e refração com as velocidades da onda em cada meio.
- Conversão de modo: Para que as tensões cisalhantes e normais se equilibrem simultaneamente na interface, uma onda P incidente deve gerar ondas P e ondas S refletidas e refratadas. O mesmo ocorre com uma onda S incidente, desde que o segundo meio suporte ondas S (seja sólido). A onda "converte" seu modo de propagação ao interagir com a fronteira, garantindo o equilíbrio das tensões tangenciais e normais na interface [23].

2.1.2.2

Impedância acústica e o princípio ultrassônico (reflexão)

A amplitude e a energia de cada uma dessas novas ondas são determinadas pela impedância acústica (Z) de cada meio, definida como o produto da densidade (ρ) pela velocidade da onda (v): $Z = \rho \cdot v$ [22].

A impedância acústica é o princípio físico central da perfilagem ultrassônica (*pulse-eco*), onde um transdutor emite e recebe o sinal. As ferramentas ultrassônicas medem a amplitude do pulso refletido (o "eco") na parede interna do revestimento, assim, mapeiam diretamente a impedância acústica do material imediatamente atrás do revestimento [21].

Para uma onda incidindo normalmente à interface, o coeficiente de reflexão de amplitude (R) e o coeficiente de transmissão (T) são dados por:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{e} \quad T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

Onde Z_1 é a impedância do meio 1 (ex: aço do revestimento) e Z_2 é a impedância do meio 2 (o material no anular).

- Má Cimentação (Fluido no anular): A interface Aço (Z_1 alto) - Fluido (Z_2 muito baixo) gera uma disparidade de impedância. Isso resulta em R próximo de -1 (inversão de fase e alta reflexão). Quase toda a energia é refletida, retornando um eco de alta amplitude.

- Boa Cimentação (Cimento no anular): As impedâncias do Aço (Z_1 alto) e do Cimento (Z_2 alto) são mais próximas. Isso resulta em um R pequeno. A maior parte da energia é transmitida (T é alto) para o cimento e a formação e não retorna ao receptor.

2.1.2.3

Atenuação e o princípio sônico (modos guiados)

Diferente do método ultrassônico, o método sônico tradicional do Perfil de Aderência do Cimento (CBL, do inglês *Cement Bond Log*) baseia-se na atenuação do sinal que se propaga ao longo da estrutura.

Em geometrias cilíndricas confinadas, como a de um revestimento de aço, a propagação acústica é complexa [19]. Em vez de se propagarem livremente como *bulk waves*, as ondas são guiadas pela estrutura, formando modos de propagação específicos, como os modos axiais, circunferenciais e flexurais no revestimento [27]. Ondas de interface, como as ondas de Stoneley, que se propagam ao longo da interface fluido-sólido, também fornecem informações relevantes [28] [29] [30].

As características desses modos guiados, como sua velocidade de propagação (que é dispersiva) e sua taxa de atenuação, são fortemente influenciadas pelas propriedades do material que circunda o revestimento [24]. É essa sensibilidade que permite inferir a qualidade da cimentação:

- Boa Cimentação (Revestimento Acoplado): A energia dos modos guiados "vaza" (*leaky modes*) eficientemente do revestimento para o cimento/formação, onde se dissipa. Isso causa uma atenuação do sinal no revestimento, resultando em um E1 de baixa amplitude [17].
- Má Cimentação (Revestimento Livre): O revestimento está isolado do anular (por fluido). A energia dos modos guiados viaja pelo aço com baixa atenuação, e os receptores medem um sinal E1 de alta amplitude [17].

O CBL, portanto, mede a perda de energia (em dB/ft) ou a amplitude (em mV) do sinal que viaja pelo *casing*, inferindo indiretamente a qualidade do acoplamento acústico com o anular. Adicionalmente, as ondas sofrem atenuação em todos os meios devido à dissipação intrínseca (no meio) e ao espalhamento geométrico da frente de onda [17].

2.1.3

Modelagem da propagação em múltiplas camadas cilíndricas

A energia acústica gerada por uma fonte localizada dentro do *tubing* deve atravessar uma sequência complexa de camadas (fluido, *tubing*, fluido anular, *casing*, cimento, formação), conforme Figura 5, para interrogar o anular de interesse (interface *casing*-cimento), e subsequentemente, retornar aos receptores, também dentro do *tubing*. O desafio da perfilagem acústica reside no fato de que essa geometria multicamadas age como um guia de onda estratificado, onde a energia é transportada por modos guiados [23].

Neste ambiente, o sinal registrado é a superposição dispersiva e atenuada de diferentes modos de onda, cada um com características distintas de velocidade, frequência e atenuação. Abaixo, são listados os principais modos de onda guiada relevantes para a avaliação da integridade do poço [5]:

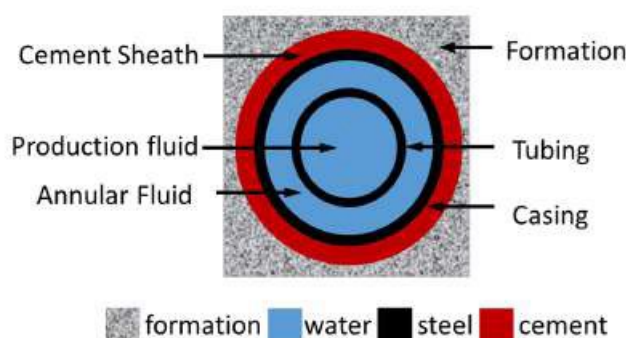


Figura 5 - Representativo da seção transversal de um poço [19].

- Ondas de Corpo (do inglês *Bulk Waves*): Ondas compressoriais (P) e cisalhantes (S) que se propagam pelo volume dos materiais (fluido, aço, cimento, formação) [5] [25].
- Ondas Guiadas: Ondas que ficam confinadas e se propagam ao longo das interfaces ou dentro das camadas cilíndricas. A geometria cilíndrica de um poço permite a existência de uma variedade de modos de onda guiada, que são classificados pela natureza do seu deslocamento. Os mais relevantes para a perfilagem são:
 - Ondas de Lamb: Modos que se propagam em estruturas finas (placas ou cascas, como o *tubing* e o *casing*). Podem ser simétricos (S₀, S₁, ...) ou antissimétricos (A₀, A₁, ...). São, por definição, "leaky" (vazam energia) para os fluidos e sólidos adjacentes, sendo essa taxa de vazamento o que permite a avaliação da cimentação

[23]. Em perfilagem ultrassônica *pitch-catch*, o modo A0 (flexural) é frequentemente utilizado, enquanto o modo S1 é relevante em pulso-eco. O modo S0 é associado à perfilagem sônica. [5] [25]

- Ondas de *Stoneley*: São ondas de interface (um modo *axisymmetric* de baixa frequência) que se propagam ao longo da interface fluido-sólido (parede do poço). Sua amplitude decai exponencialmente para longe da interface [22]. São sensíveis às propriedades do fluido e à permeabilidade da formação. [5] [25]
- Ondas Flexurais (Dipolo): São modos não-*axisymmetric* (ex: F(1, n)), que induzem uma "dobra" ou flexão no tubo (*bending modes*). Esses modos são altamente sensíveis às condições fora do casing (ex: formação) e à excentricidade da ferramenta, sendo a base do VDL para identificação da chegada da formação [24]. Importantes para a medição direta da velocidade da onda S da formação. [5] [25]
- Ondas *Pseudo-Rayleigh*: Modos que se propagam ao longo da interface com velocidades próximas à da onda P da formação, importantes para a interpretação da resposta do meio rochoso [5] [25].
- Modos Longitudinais (ou Axiais, L-modes): São modos *axisymmetric* (simétricos) onde o deslocamento principal ocorre ao longo do eixo do tubo. O modo L (0,1) é, por sua vez, a base para a primeira chegada (E1) em ferramentas sônicas, sendo a atenuação desse modo crucial para a medição CBL [24].

Em cada interface (fluido-aço, aço-cimento), a onda incidente sofre reflexão, refração e conversão de modo.

A travessia dessa sequência de múltiplas camadas (*tubing-casing*) resulta em uma severa atenuação da energia que investiga o anular *casing*-cimento (anular B). Consequentemente, o sinal de interesse que retorna aos receptores é fraco e sobreposto por ruído (reverberações do *tubing*), tornando sua detecção um crítico desafio de Relação Sinal-Ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*).

2.2

Métodos de perfilagem acústica para avaliação do cimento

A avaliação da integridade do cimento por métodos acústicos é dominada por duas abordagens físicas distintas, que operam em regimes de frequência e princípios de medição fundamentalmente diferentes: a perfilagem sônica (baixa frequência) e a ultrassônica (alta frequência) [23]. A interpretação dos volumosos dados

coletados nas operações de perfilagem é uma tarefa complexa, historicamente dependente da análise de especialistas, o que pode introduzir subjetividade e consumir tempo considerável. A complexidade é amplificada em cenários de perfilagem através da coluna de produção [31]. A tubulação interna causa atenuação e dispersão significativa dos sinais acústicos, e as múltiplas interfaces geram reflexões e ressonâncias complexas que podem mascarar os sinais de interesse provenientes da interface cimento-formação [6]. Adicionalmente, o diâmetro restrito do *tubing* impõe limitações ao tamanho e à potência das ferramentas de perfilagem TT. A investigação científica de técnicas de perfilagem TT é recente, explorando simulações numéricas e experimentos em modelos escalonados [27] [32] [33].

A perfilagem sônica do CBL foi introduzida no final da década de 1950. As primeiras ferramentas utilizavam a técnica de pulso-eco, onde o mesmo transdutor emitia e recebia as ondas [34]. Versões posteriores e mais avançadas adotaram o princípio de transmissão-recepção (do inglês, *pitch-catch*) [5] [35] [26] [36] onde pulsos acústicos são emitidos a partir de um transmissor e registrados por um ou mais receptores posicionados a distâncias conhecidas (usualmente 3ft e 5ft do transmissor), conforme ilustrado na Figura 6, que opera em baixas frequências (tipicamente 1-20 kHz) e se baseia na atenuação dos modos guiados para inferir a qualidade do acoplamento cimento-revestimento [25].

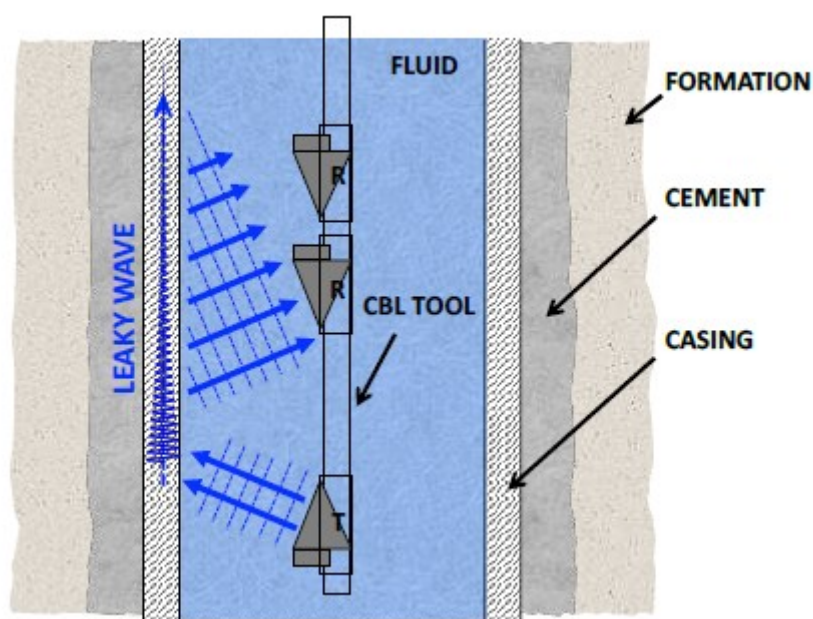


Figura 6 - Esquemático da técnica pitch-catch. O sinal acústico é gerado pelo transmissor (T) e captados pelos receptores (R) [20].

Se o revestimento estiver firmemente cimentado, o acoplamento acústico entre o revestimento e a formação permite que a energia acústica penetre facilmente na formação. Assim, o restante da energia acústica que viaja pelo revestimento é pequeno [37]. Por outro lado, se o revestimento estiver mal cimentado na formação, o fluido ao redor/entre eles impedirá que a energia acústica vaze para a formação. Uma forte energia acústica fica confinada dentro do revestimento e viaja até atingir os receptores na ferramenta. Como a velocidade do som no aço do revestimento é a mais rápida, o primeiro pico de chegada na forma de onda dos receptores está associado à energia acústica que viaja pelo revestimento. Sua amplitude, chamada amplitude E1, é então geralmente usada para determinar a qualidade da aderência do cimento [37].

Mecanismo de Medição:

1. Amplitude (E1): O CBL mede a amplitude da primeira onda acústica (E1) que chega ao receptor mais próximo, após se propagar predominantemente através da parede do revestimento.
 - Um *casing* acusticamente “livre” (*free pipe*), isolado por fluido ou gás, permite que os modos guiados viajem com baixa atenuação, resultando em um sinal E1 de alta amplitude, caracterizando uma má cimentação.
 - Em um *casing* acoplado a um cimento sólido (boa cimentação), a energia do modo guiado “vaza” (*leaky modes*) do aço para o cimento/formação, onde se dissipa. Isso causa uma alta atenuação do sinal, resultando em um E1 de baixa amplitude [24].
2. Índice de aderência (BI): A partir dessa amplitude, calcula-se o Índice de Aderência (*Bond Index* - BI) [16]. O tempo de trânsito da primeira chegada serve como controle de qualidade da ferramenta.

O Perfil de Densidade Variável (VDL do inglês, *Variable Density Log*) complementa o CBL ao registrar o trem de ondas completo (*full waveform*) em um receptor mais distante (usualmente a 5 pés). O sinal é exibido como um mapa de intensidade (ou mapa de densidade) que permite visualizar as diferentes chegadas de energia, incluindo as ondas flexurais e de *Stoneley* que atravessaram o cimento e a formação. A presença de sinais claros (próximo ao branco na escala de cinza) da formação no VDL é o indicativo visual de boa ligação acústica nas interfaces cimento-revestimento e cimento-formação, conforme ilustrado na Figura 7.

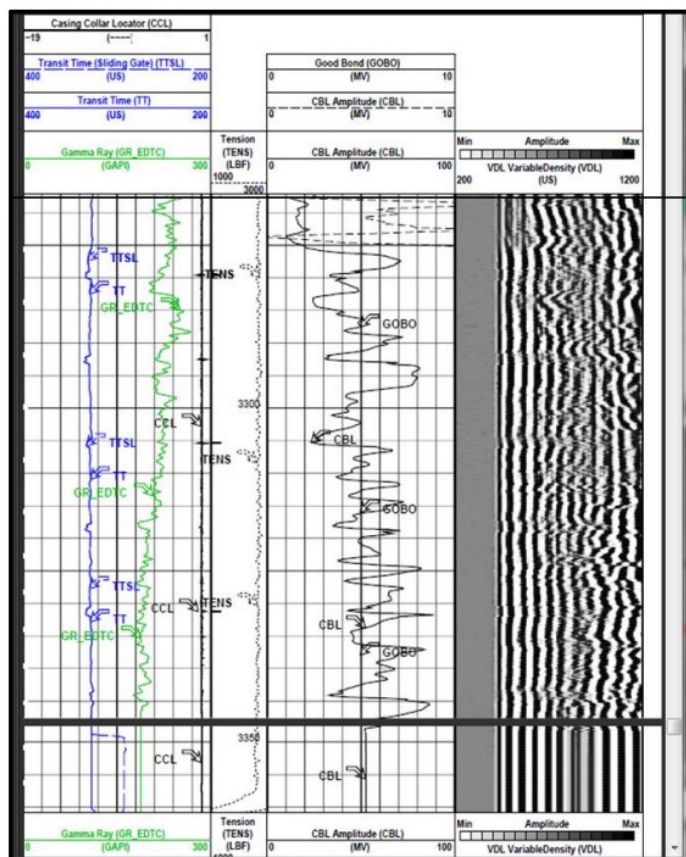


Figura 7: Gráfico CBL/VDL [38].

O gráfico é composto por três *plots* principais, todos em função da profundidade (eixo vertical):

1. Trilha 1: Tempo de trânsito do CBL: Apresenta o Δt (em $\mu s/ft$ ou $\mu s/m$), usado primariamente para controle de qualidade e calibração da velocidade do *casing*, garantindo que o sinal detectado tenha viajado na velocidade esperada do revestimento. Também pode ser visualizado a indicação do Localizador de Colar de Revestimento (CCL, do inglês *Casing Collar Locator*). A principal função do CCL é correlacionar a profundidade para outras operações. Ao mapear a posição dos colares (uniões rosqueadas) da coluna de revestimento de um poço, utilizando o princípio do eletromagnetismo, é possível alinhar logs de poços revestidos com logs de poços abertos, garantindo a precisão de todas as medições de profundidade. [38]
2. Trilha 2: Amplitude do CBL: Apresenta a amplitude da primeira chegada (E1), em milivolts (mV), que mede a aderência do cimento ao revestimento.

3. Trilha 3: VDL (Mapa de Intensidade): É a representação da forma de onda completa.

- Eixo Horizontal: Representa o tempo (ou tempo de trânsito) após a emissão do pulso.
- Eixo Vertical: É a profundidade.
- Intensidade (Cor/Escala de Cinza): A intensidade do sinal de cada chegada de onda.
- Interpretação: Faixas escuras horizontais indicam ondas fortes (baixa atenuação), como a onda do revestimento (*casing*). A presença de sinais diagonais ou mais lentos, com forte intensidade (as chamadas chegadas da formação), confirma que a energia atravessou eficientemente o cimento e acoplou-se à formação, indicando boa qualidade de cimentação. [38]

A perfilagem ultrassônica de pulso-eco, chamadas de USIT (do inglês, *Ultrasonic Imager Tool*) opera em um regime de altas frequências (200 kHz a 1 MHz). Nesse regime, a ferramenta emite um pulso de energia focado perpendicularmente à parede do revestimento. O método se baseia no princípio da reflexão, onde o pulso emitido atinge a interface interna do casing e a energia é devolvida ao transdutor na forma de um "eco" [21], conforme Figura 8. A amplitude desse eco de retorno é uma função direta do coeficiente de reflexão (R), que, por sua vez é diretamente determinada pelo contraste de impedância acústica (Z) entre o aço e o material imediatamente atrás dele, conforme definido pelo coeficiente de reflexão [22]. Na presença de um anular preenchido por fluido ou gás, a disparidade de impedância com o aço é máxima, resultando em uma reflexão intensa e um eco de alta amplitude. Quando há cimento sólido, a impedância é mais próxima da do aço, o que minimiza a reflexão e maximiza a transmissão para o anular, resultando em um eco de baixa amplitude. Por ser uma medição azimutal, este método é altamente eficaz na detecção de canalizações e defeitos sutis, como microanulares [21].

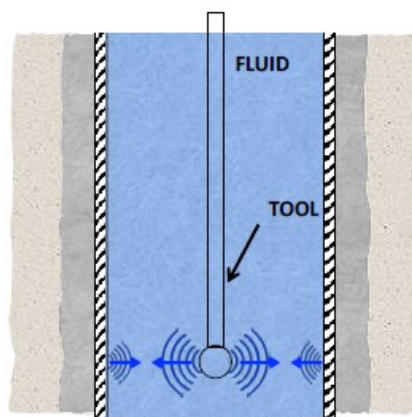


Figura 8 - Ilustração do princípio pulso-eco. Adaptado de [20].

Apesar de sua vasta aplicação, as ferramentas convencionais apresentam limitações conhecidas. Ambas podem ser afetadas por condições adversas no poço, como fluidos pesados, presença de gás e excentricidade da ferramenta, e têm dificuldade em caracterizar cimentos especiais ou detectar defeitos sutis como microanulares. Bem como a limitada resolução azimuthal dificulta a identificação de canalizações [28] [29].

2.3

Propagação de ondas acústicas em geometrias de poços complexas

Os princípios descritos no capítulo anterior são aplicados em um ambiente que se comporta como um guia de onda cilíndrico, estratificado e multifásico (fluido, aço, cimento, formação). A propagação real é, portanto, significativamente mais complexa do que a de ondas de corpo livres ou a de modos guiados em uma placa simples. A resposta acústica medida por um receptor é a superposição interferencial dos eventos de propagação, incluindo reflexões, refrações e conversões de modo que ocorrem nas interfaces do sistema.

2.3.1

Desafio da perfilagem através da coluna de produção

Tradicionalmente, as operações de perfilagem para avaliação do cimento são realizadas após a instalação do revestimento, na etapa de cimentação, e antes da descida da coluna de produção. No entanto, a necessidade de avaliar a integridade

do cimento pode surgir posteriormente, no planejamento de operações de intervenção ou, mais criticamente, antes do abandono definitivo. Nestes cenários, a presença da coluna de produção representa um obstáculo significativo, sendo sua remoção uma operação complexa, cara e demorada, particularmente em ambientes *offshore* [6].

Uma limitação operacional significativa das técnicas convencionais de avaliação de cimento é a necessidade de acesso direto ao revestimento que se deseja avaliar. Isso implica que seja necessário a remoção do *tubing* antes da perfilagem, uma operação que consome tempo de sonda (*rig time*) e acarreta custos operacionais elevados. Diante desse cenário, a perfilagem acústica pela coluna de produção surge como uma alternativa altamente desejável, tornando o processo de P&A mais eficiente e potencialmente viabilizando o monitoramento periódico da integridade do cimento ao longo da vida útil do poço, como nos casos de abandono temporário [39].

No entanto, a perfilagem TT enfrenta desafios técnicos impostos pela complexa geometria do poço. Essa geometria tipicamente se configura como um sistema de múltiplas camadas cilíndricas, concêntricas ou excêntricas, compreendendo: o fluido dentro do *tubing*, a parede do *tubing*, o fluido ou sólido no anular A (entre *tubing* e *casing*), a parede do *casing*, o cimento ou fluido no anular B (entre *casing* e formação), e a própria formação rochosa conforme ilustrado na Figura 9. A energia acústica emitida por uma fonte dentro do *tubing* precisa atravessar todas essas camadas para interagir com o anular B, onde reside a informação de interesse sobre a cimentação, e retornar aos receptores, também localizados dentro da coluna de produção, conforme Figura 6.

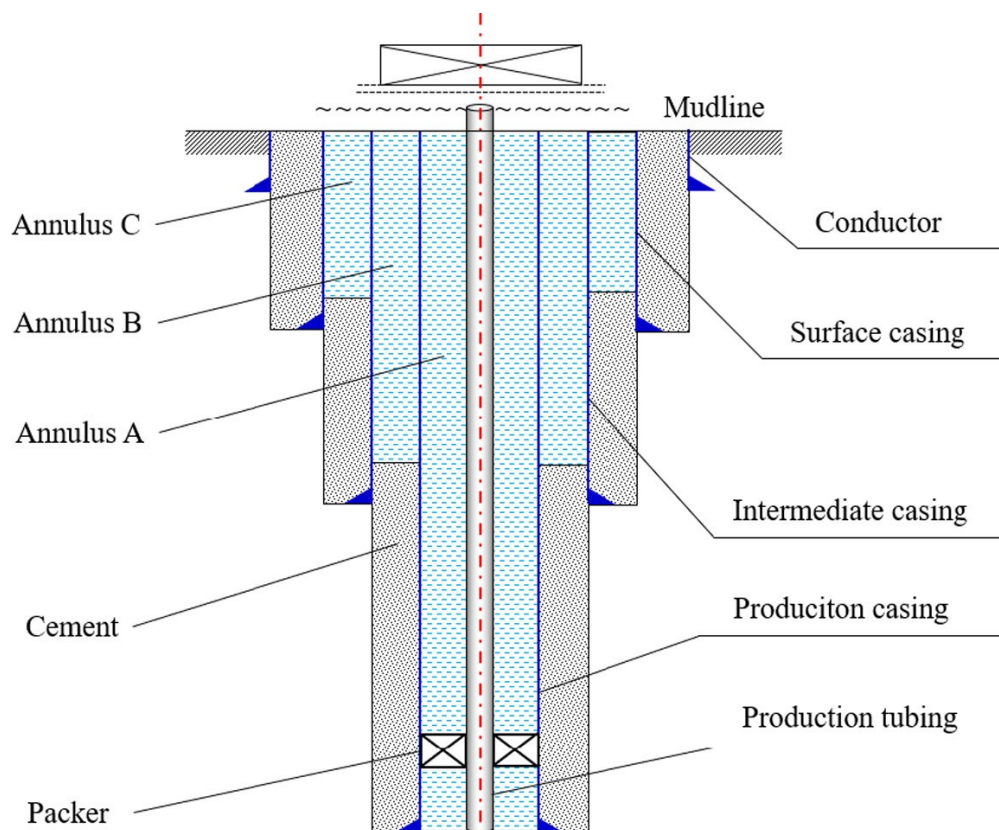


Figura 9: Camadas do poço de petróleo [24].

Nesse trajeto com diversas interfaces, as ondas acústicas sofrem múltiplos fenômenos de atenuação, reflexão, refração e conversão de modo em cada camada entre materiais com diferentes propriedades acústicas [27].

O sinal que efetivamente retorna aos receptores após interagir com o anular B, região intermediária de interesse, é atenuado. Além disso, esse sinal de interesse (acoplamento cimento-*casing*) de baixa amplitude, é sobrepujado pelo sinal dominante da parede da tubulação, que se propagam diretamente pelo *tubing* ou são refletidos nas interfaces internas (*fluido-tubing*, *tubing-anular A*, *anular A-casing*) [39].

Zhang *et al.* [37] explica que, após passar pela *tubing* e pelo fluido anular e atingir o *casing*, apenas 23% da energia acústica incidente resta para continuar em direção à interface cimento-formação. O restante (77%) foi refletido ou ficou confinado. Como o sinal CBL deve viajar duas vezes através das interfaces da *tubing* (ida e volta) para chegar ao receptor há uma perda de 95% da energia acústica que seria esperada na ausência da *tubing* [37].

A situação torna-se ainda mais desafiadora frente à excentricidade do *tubing* dentro do *casing*, uma condição comum em poços reais, conforme Figura 10 [40].

A falta de simetria azimutal introduzida pela excentricidade altera os caminhos de propagação das ondas, modifica os tempos de chegada e a distribuição de energia nos receptores, tornando a resposta acústica dependente da posição azimutal da fonte e dos receptores [20].

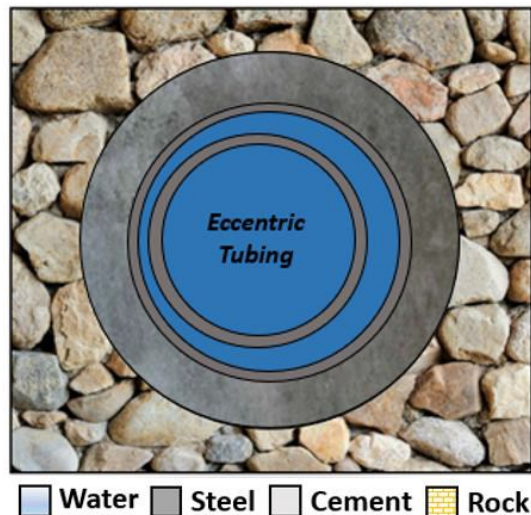


Figura 10 - Excentricidade do *tubing* em relação ao *casing* [20].

Como resultado de todos esses fatores, as formas de onda adquiridas em perfilagem TT são extremamente complexas e ricas em eventos sobrepostos, tornando a interpretação visual ou baseada em métodos de análise convencionais (como a simples medição de amplitude ou tempo de trânsito) subjetiva e inconclusiva. Distinguir a assinatura sutil de um defeito no anular B do ruído de fundo e das múltiplas reflexões e modos guiados nas camadas internas é um desafio considerável.

A excentricidade geométrica, ferramenta desalinhada no *tubing*, conforme Figura 11, comum em poços reais, agrava o desafio em interpretar os dados acústicos. O tempo de propagação do transmissor para o *casing* e de volta para os receptores torna-se dependente da posição azimutal [41] [42]. A mitigação principal é o uso de centralizadores adequados [43]. O impacto na medição é que a amplitude do sinal recebido pode variar com a rotação da ferramenta. Um sinal de baixa amplitude pode ser interpretado erroneamente, quando na verdade é resultado de um desalinhamento geométrico do feixe acústico. Isso pode invalidar medições que não levam em conta a posição azimutal e justifica a necessidade de bancadas que controlem a excentricidade.

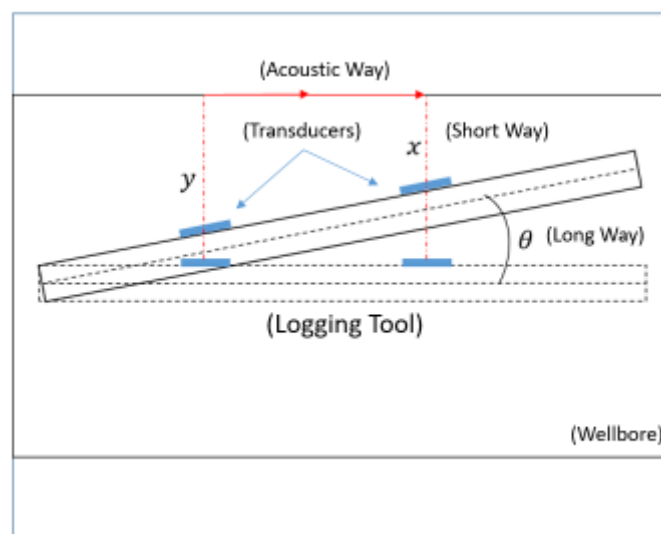


Figura 11 - Representação de ferramenta excêntrica [20].

Alguns dos desafios estão resumidos abaixo:

- Atenuação severa do sinal: A energia acústica emitida pela ferramenta precisa atravessar múltiplas interfaces com grandes contrastes de impedância: fluido interno-*tubing*, *tubing*-fluido anular, fluido anular-revestimento, revestimento-cimento, e potencialmente cimento-formação, e depois retornar pelo mesmo caminho. Cada travessia de interface aço-fluido causa reflexão e atenuação significativas, resultando em um sinal que chega à interface do cimento e retorna à ferramenta enfraquecido [39] [37].
- Interferência dominante do *tubing*: A coluna de produção, sendo um tubo de aço imerso em fluido, atua como um excelente guia de ondas. Uma grande porção da energia acústica emitida fica confinada e se propaga ao longo da parede do *tubing*, chegando aos receptores muito antes e com amplitude muito maior do que os sinais que interagem com o revestimento e o cimento externo. Esse sinal forte e precoce do *tubing* pode causar reverberação e mascarar os sinais mais fracos de interesse e até saturar os receptores, tornando a extração da informação sobre o cimento extremamente difícil com métodos convencionais baseados na primeira chegada ou amplitude total [39] [37].
- Propagação complexa de ondas: A geometria multicamadas cria um ambiente complexo para a propagação de ondas, com múltiplos modos guiados sendo excitados nas diferentes colunas (*tubing* e revestimento) e

interagindo através do fluido anular [6]. Compreender e separar a contribuição de cada modo ao sinal recebido é um desafio.

- Inadequação da interpretação convencional: Métodos de interpretação padrão desenvolvidos para a perfilagem em revestimento único (*single casing*), não são recomendados e podem gerar resultados enganosos na configuração *through-tubing* [6]. A primeira chegada é quase invariavelmente o sinal do *tubing*, que não contém informação sobre o cimento externo.
- Necessidade de técnicas avançadas para análise: Superar esses desafios exige o desenvolvimento e a aplicação de técnicas de processamento de sinais mais sofisticadas como:
 - Análise no domínio da frequência: É a conversão de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, tipicamente utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*). O domínio da frequência (eixo f) representa o sinal como uma soma de componentes sinusoidais em diferentes frequências. Permite separar componentes que operam em faixas de frequência distintas (por exemplo, ruído de vibração de alta frequência ou as bandas específicas de ressonância dos tubulares), facilitando a filtragem de ruído estrutural. É essencial para a análise dos modos guiados, que são dispersivos (suas velocidades dependem da frequência) [39].
 - Frequência - Número de Onda ($f-k$): realiza uma dupla transformada de Fourier: uma no tempo (para o domínio da frequência, f) e outra na dimensão espacial ao longo do *array* (para o domínio do número de onda, k). O número de onda (k) é o inverso do comprimento de onda (λ), e está diretamente relacionado à velocidade de propagação do modo ($v = f/k$) [19]. Essa transformação mapeia o sinal completo (o full *waveform* registrado em todos os receptores) para o plano $f-k$. Cada modo de onda (ex: modo dominante do *tubing*, modo *casing*, onda de Stoneley) aparece como uma linha reta ou curva distinta no gráfico. Isso permite identificar, isolar e remover o modo indesejado do *tubing* e, crucialmente, extrair o modo do *casing* para a avaliação da atenuação [6].

- Também podem ser usadas abordagens baseadas em *machine learning* treinadas especificamente para reconhecer padrões em dados *through-tubing* [44].

2.4

Soluções de pesquisa e comerciais

A passagem de ferramentas de perfilagem acústica através da coluna de produção impõe limitações significativas ao projeto e ao tamanho das ferramentas que podem ser utilizadas. O diâmetro interno da tubulação restringe as dimensões da ferramenta, o que pode limitar a potência da fonte acústica, bem como o número e o espaçamento dos receptores. Isso frequentemente requer o uso de ferramentas de diâmetro reduzido (*slimhole tools*), que podem apresentar um desempenho inferior em termos de resolução e profundidade de investigação em comparação com ferramentas convencionais utilizadas em poços abertos. Assim, o projeto de ferramentas TT deve equilibrar as restrições dimensionais com a necessidade de obter dados acústicos de qualidade.

A realização de operações de perfilagem com a coluna de produção instalada apresenta desafios operacionais adicionais, como o risco de bloqueios na tubulação e a necessidade de métodos de implantação especializados como *coiled tubing* e *wireline* que podem impactar a velocidade e qualidade dos dados.

A indústria de O&G tem buscado ativamente desenvolver tecnologias para avaliação da cimentação. Diversas abordagens comerciais e de pesquisa foram propostas, para atender os diferentes requisitos, seja em resoluções detalhadas ou ferramentas que abranjam maior gama de defeitos:

- Weatherford MSIL (*Multi-String Isolation Logging Tool*): Projetada para avaliação *multi-string*, baseia-se na identificação de frequências de ressonância do revestimento externo e como são alteradas pelo cimento, utilizando processamento proprietário no domínio da frequência [29]. Apresenta também a ferramenta SBT (*Sector Bond Tool*), comercializada como *BondView®*, com múltiplos transmissores e receptores cobrindo setores circulares para fornecer CBL/VDL com cobertura 360°. A ferramenta *UltraView®* utiliza

transdutores ultrassônicos rotativos para identificar *channeling* e medir a espessura do cimento. [45] [46].

- Schlumberger: Oferece ferramentas convencionais (CBL, VDL, atenuação) e *slim* para operação TT, como a SCMT (*Slim Cement Mapping Tool*) e a *Memory Slim CBL Tool*, baseadas nos princípios que fornecem medições padrão de CBL/VDL [47]. Ferramentas como a *Isolation Scanner* combinam pulso-eco ultrassônico com análise de ondas flexurais para mapeamento azimuthal detalhado atrás de um único revestimento [47].
- Halliburton CAST (*Circumferential Acoustic Scanning Tool*): Utiliza transdutores ultrassônicos em uma ponteira rotativa para imagens 360° de alta resolução da parede interna do revestimento e avaliação da primeira interface de cimentação [48].
- BHGE (Baker Hughes) e GoWell International: Oferecem a RBT (*Radial Bond Tool*), que, além do CBL/VDL tradicional, possui um conjunto de 8 receptores acústicos radiais para inspeção circunferencial e mapeamento da integridade do cimento. [49] [50].
- Hunting Energy Services: Fornece ferramentas CBT (*Cement Bond Tools*) padrão (CBL/VDL) e ferramentas com transdutores radiais como a RIB (*Radial Incremented Bond Tool*) e HD-RIB, que buscam maior precisão no mapeamento 360° do cimento [51].

2.5

Cimentação de poços e tipos de defeitos

O material padrão e ideal para garantir o isolamento hidráulico e o suporte estrutural do revestimento em poços de petróleo e gás é o Cimento Portland para Poços de Petróleo (CPP), em conformidade com a API Specification 10A [52]. As Classes G e H são as mais versáteis, sendo formuladas com aditivos específicos para suportar as altas pressões e temperaturas de subsuperfície, e para manter o tempo de espessamento (pega) controlado, garantindo que a lama permaneça bombeável por horas até a colocação no anular revestimento-formação.

Contudo, esses cimentos especializados não foram utilizados na bancada de testes devido a uma restrição logística e econômica, decorrente da exigência de

quantidade mínima de pedido do cimento API que era incompatível com o escopo da operação. Como alternativa, foi selecionado o cimento “Supergraute”, e após a cimentação do primeiro tubo, conforme apresentado no capítulo 4.1.1, foi substituído pelo “Sikagrout 250”, um graute cimentício de alto desempenho utilizado em engenharia civil, devido às suas semelhanças superficiais: ambos são à base de Cimento Portland, possuem alta fluidez para preenchimento (característica positiva para que auxilia no processo de vazamento do molde) e oferecem elevada resistência à compressão.

A função primordial do cimento em um poço de O&G, especialmente no contexto do abandono permanente, é prover uma barreira hidráulica eficaz e duradoura. Falhas ou defeitos na bainha de cimento comprometem esta barreira, violando requisitos regulatórios de P&A e representam riscos operacionais e ambientais. A identificação e caracterização desses defeitos são, portanto, cruciais. Sendo assim, a bancada foi idealizada para reproduzir alguns dos defeitos encontrados em poços reais, conforme citados por Correia [20].

São eles:

- Canalizações (*Channeling*): São caminhos contínuos de fluido no cimento, frequentemente causados por mau condicionamento do poço, migração de gás ou água, ou deslocamento ineficiente da lama. As canalizações representam uma falha grave de isolamento, pois permitem o fluxo direto entre zonas que deveriam estar isoladas. Logs ultrassônicos azimutais são mais eficazes para mapeá-los, pois conseguem realizar uma varredura direcional, em diferentes angulações do poço [20].
- Descolamento/Falta de Aderência (*Debonding*): Refere-se à ausência de ligação física entre o cimento e as superfícies adjacentes, seja a interface cimento-revestimento (primeira interface) ou a interface cimento-formação (segunda interface). Descolamento revestimento-cimento se assemelha a microanular ou revestimento livre [20].
- Microanular (*Microannulus*): É um tipo específico de descolamento, caracterizado por um gap anular muito fino nas interfaces, geralmente preenchidos por fluido, que podem permitir migração de fluidos (especialmente gás) e são difíceis de detectar com CBL convencional. Pode ser causado por contração do cimento durante a cura, expansão/contração térmica do revestimento após a cimentação, queda de pressão hidrostática,

ou contaminação da superfície do revestimento (graxa, verniz) impedindo a aderência inicial [20] [30].

- Cimento contaminado/molhado (*Wet Cement/Contaminated Cement*): Cimento misturado com lama ou outros fluidos. A contaminação altera as propriedades do cimento, reduzindo sua resistência mecânica, aumentando sua permeabilidade e diminuindo sua impedância acústica [20] [21].
- Ausência de cimento (*Free Pipe*): Situação em que o anular, ou parte dele, não foi preenchido com cimento, permanecendo preenchido com o fluido de perfuração ou outro fluido presente no poço. Isso representa uma ausência completa de barreira naquele intervalo [20] [30].

2.6

Aspectos estruturais e dimensionamento mecânico da bancada de testes

O projeto de uma bancada experimental para simulação de condições de poço impõe não apenas a reprodução geométrica dos componentes tubulares, mas também a garantia de estabilidade estrutural e segurança operacional para tanto, a metodologia de projeto fundamenta-se na aplicação de princípios de equilíbrio estático e critérios de dimensionamento mecânico. As memórias de cálculo dos dimensionamentos são apresentadas no Capítulo 3.2.1.2.

Preliminarmente, deve-se estabelecer a definição da grandeza física primária atuante no sistema. Conforme Hibbeler [53], a força é caracterizada como uma ação vetorial de um corpo sobre outro, capaz de alterar seu estado de movimento ou provocar deformações. Na presente bancada, as forças incluem o peso próprio dos componentes, as reações nos apoios e as cargas operacionais na montagem e execução dos testes. A equação da força pode ser resumida como:

$$F = m \cdot a$$

Onde:

F : Força resultante (Newton, N)

m : Massa do corpo (kg)

a : Aceleração vetorial (m/s^2)

Para garantir a integridade do sistema, este deve operar em regime estático. Segundo Budynas e Nisbett [54], um sistema encontra-se em equilíbrio estático se

a soma vetorial das forças externas e a soma dos momentos atuantes forem nulas ($\sum F = 0$ e $\sum M = 0$). Essas condições asseguram a ausência de translações e rotações indesejadas, respectivamente.

O conceito de momento (ou torque) é intrínseco à análise de estabilidade rotacional de um corpo sob ação de forças externas. O momento de uma força em relação a um ponto ou eixo é definido pelo produto vetorial da força aplicada pelo vetor posição. Em termos escalares simplificados, para uma força perpendicular ao braço de alavanca, tem-se [53]:

$$M = F \cdot d$$

Onde:

M : Momento atuante [$N \cdot m$];

F : Força aplicada [N];

d : Distância perpendicular entre a linha de ação da força e o ponto de referência [m].

No contexto específico da bancada de testes, essa condição é fundamental para evitar o tombamento da estrutura quando submetida a esforços durante a movimentação da ferramenta ou manipulação dos tubos. O cálculo do momento resistente da base é realizado considerando a aplicação de uma força perpendicular no topo da estrutura e a distância até o ponto de fixação, garantindo que o momento resistente supere o momento atuante. O dimensionamento da largura mínima da base, foi realizado considerando o equilíbrio de momentos, conforme a equação:

$$F_L \cdot d = P_T \cdot \frac{L_B}{2}$$

Onde:

F_L : Força lateral aplicada

d : Distância entre o ponto de aplicação da força e a base

P_T : Peso total do conjunto

L_B : Largura da base.

Essa abordagem analítica assegura que o momento resistente supere o momento atuante, atendendo aos requisitos de estabilidade.

Além da base, os elementos de fixação, como parafusos e roscas, desempenham papel crítico na integridade estrutural. Os parafusos do flange foram dimensionados considerando esforços combinados de tensão e cisalhamento, aplicando o critério de Von Mises, que estabelece que a falha ocorre quando a

energia de distorção no material atinge o valor crítico equivalente ao escoamento sob tensão uniaxial. A tensão equivalente de Von Mises (σ_{eq}) para um estado plano de tensão é dada por [54]:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{V}{A}$$

Onde:

σ : Tensão normal de tração axial [Pa];

τ : Tensão de cisalhamento transversal [Pa];

A_S : Área de seção resistente do parafuso [m^2];

F : Força cortante atuante [N].

Para garantir a fixação do sistema, especificaram-se parafusos M16, Classe de resistência 10.9 [55]. Conforme ISO 898-1, esta classe estabelece propriedades mecânicas como limite de resistência à tração de 1000 MPa e limite de escoamento de 900 MPa. O fator de segurança foi calculado com base na relação entre o limite de escoamento e a tensão equivalente obtida.

A força de tração atuante no parafuso decorre do momento fletor e é estimada pela relação:

$$F_{tração} = \frac{M}{r}$$

onde:

r : Distância radial do centro do flange até a linha de centro dos parafusos.

A partir da força em cada parafuso é calculada a tensão equivalente atuante no parafuso, permitindo assim, o dimensionamento do componente.

Por fim, a conexão entre o cap inferior e o *outer casing* emprega uma rosca do tipo *Stub Acme*. Este perfil de rosca trapezoidal é amplamente difundido em equipamentos de poço devido à sua robustez na transmissão de cargas axiais elevadas e facilidade de acoplamento. Segundo Budynas e Nisbett [54], o dimensionamento de roscas de potência ou fixação deve priorizar a verificação da pressão de contato na interface entre os filetes. Embora a falha por cisalhamento

seja possível, o esmagamento superficial tende a ocorrer com cargas inferiores, sendo, portanto, o critério governante para a definição do comprimento de engajamento (L_e) necessário. A pressão média de contato (σ_b) é determinada pela razão entre a força axial equivalente e a área projetada de contato dos filetes engajados, conforme a equação:

$$\sigma_b = \frac{F_{eq}}{A_{proj}} = \frac{F_{eq}}{\pi \cdot d_m \cdot L_e \cdot \left(\frac{h}{p}\right)}$$

Onde:

σ_b : pressão média de contato nos flancos da rosca [Mpa].

F_{eq} : força axial equivalente [N];

A_{proj} : área projetada de contato entre os filetes;

d_m : diâmetro médio da rosca [m];

L_e : comprimento de engajamento [m];

h : altura do filete da rosca [m];

p : passo da rosca [m].

O critério de segurança estabelece que a pressão atuante σ_b deve ser inferior à tensão admissível de esmagamento do material, garantindo que não ocorra deformação plástica localizada que comprometa a desmontagem ou a integridade da união.

2.7

Bancadas de testes experimentais para simulação de poços

A literatura apresenta exemplos de bancadas que simulam condições de poço, variando em design, capacidade de simular alta pressão/temperatura e diferentes configurações de revestimento. Embora a simulação de condições de alta pressão e temperatura seja ideal para maior realismo, para o presente projeto, optou-se por não incluir esses requisitos devido às limitações laboratoriais e financeiras, dando enfoque assim, ao desenvolvimento de defeitos na camada de cimento, presença ou não do *tubing* e a possibilidade de excentricidade do *tubing* com relação ao *casing*.

Esses setups experimentais controlados servem a múltiplos propósitos:

- Validação de modelos numéricos: Permitem comparar previsões de simulações como Método dos Elementos Finitos (FEM, do inglês *Finite Element Method*), utilizado para resolver equações diferenciais para análise estrutural, acústica, transferência de calor e outros fenômenos físicos e Diferença Finita no Domínio do Tempo (FDTD, do inglês *Finite-Difference Time-Domain*), método que discretiza as equações de Maxwell no espaço e no tempo para simular a interação de ondas com materiais com medições reais em geometrias conhecidas, validando a precisão dos modelos computacionais.
- Teste de protótipos: Oferecem um ambiente para testar e refinar novos designs de ferramentas de perfilagem (fontes, receptores, eletrônica) antes de sua implementação em campo.
- Geração de dados controlados: Possibilitam a aquisição de conjuntos de dados onde as condições (geometria, materiais, defeitos, excentricidade) são conhecidas e controladas com precisão. Isso é essencial para desenvolver e treinar algoritmos de processamento de sinais e aprendizado de máquina.
- Estudo da física fundamental: Permitem isolar e estudar fenômenos específicos de propagação de ondas em um ambiente mais simples e acessível do que um poço real.

A evolução das bancadas experimentais reflete uma busca contínua por maior realismo e representatividade das condições encontradas em campo, como a presença da coluna de produção. Alguns exemplos que utilizaram bancadas para a avaliação da camada de cimento através da perfilagem acústica em configurações *multi-string* incluem:

- Talberg *et al.* [27]: Esse trabalho utilizou uma bancada de estrutura planar em escala de laboratório. Consistia em camadas sobrepostas, com uma camada superior de fluido (água) representando o poço, e camadas inferiores de placas de aço (3 mm de espessura) para simular revestimentos, separadas por ar ou água para representar o anular. Utilizaram um transdutor ultrassônico de 1 MHz como fonte e um hidrofone como receptor, empregando a técnica *pitch-catch* (fonte e receptor inclinados). Um dos focos foi estudar a propagação de ondas *leaky Lamb* nas placas de aço e como a excentricidade (simulada pela inclinação relativa entre duas placas)

afetava a propagação dessas ondas. Concluíram que as ondas *leaky Lamb* exibiam características de feixe colimado com espalhamento limitado e que a excentricidade introduzia desvios na trajetória de certos pacotes de ondas, sugerindo a possibilidade de detectar a inclinação analisando a distribuição espacial das ondas. A configuração planar, embora simplificada, permitiu fácil manipulação e estudo de fenômenos básicos, porém bolhas de ar e ondas de água interferiram no sinal. Além disso, a escala reduzida limita a análise de fenômenos de propagação de longa distância e a simulação de excentricidade realista entre colunas.

- Liu *et al.* [56]: Esse estudo empregou uma abordagem mais realista geometricamente, utilizando tubos de aço cilíndricos concêntricos ou excêntricos em escala reduzida (escala $\frac{1}{4}$). Os tubos simulavam um sistema de duplo revestimento (*inner* e *outer casing*) imerso em um grande tanque de água para minimizar reflexões externas. A excentricidade relativa entre os tubos era controlada com precisão (0%, 50%, 75%) usando espaçadores acusticamente transparentes fabricados por impressão 3D. A fonte acústica consistia em um arranjo de quatro hidrofones (operando a 10 kHz) posicionados circunferencialmente dentro do tubo interno, enquanto um único hidrofone receptor era movido axial e azimutalmente para sintetizar um grande arranjo de receptores (16 azimutes vs. 46 posições axiais). Uma contribuição importante foi a simulação controlada de defeitos de cimentação: amostras foram preparadas com o anular externo (anular B) preenchido com cimento, mas com canais preenchidos por fluido introduzidos propositalmente com diferentes coberturas azimutais, 45°, 90°, 180°. Este setup permitiu investigar a sensibilidade das ondas guiadas acústicas (monopolo, dipolo) às condições de cimentação e à presença de defeitos no anular externo em uma configuração *multi-string* mais representativa. Concluíram que a presença de canais de fluido faz com que as ondas dipolo se dividam em modos simétricos e antissimétricos, e que uma pequena excentricidade pode ser ignorada na interpretação. A utilização de alumínio em vez de aço carbono introduz uma discrepância na impedância acústica ($Z_{Al} \approx 17 \text{ MRayl}$ vs. $Z_{Steel} \approx 45 \text{ MRayl}$), alterando os coeficientes de reflexão e transmissão e, consequentemente, a resposta

do sinal em comparação com o cenário de campo. Adicionalmente, o comprimento curto (1,5 m) torna o sistema suscetível a reflexões de extremidade, contaminando o sinal de interesse.

- Govil *et al.* [37]: Esse estudo utilizou seis células de referência, construídas com tubulação de 7" dentro de um revestimento de 9 5/8", que podiam ser acopladas verticalmente. Os dados foram interpretados usando mapas Sólido-Líquido-Gás (SLG) que combinam as medições de pulso-eco e *pitch-catch* (flexural). Foram implementadas seis condições diferentes: Linha de controle cimentada (linha de controle com *flatpack* cimentada no anular; cimento de boa qualidade (sem defeitos), microanular (microanular "efetivo" entre 20 e 50 μm), canais (furos com diâmetros de 5, 10, 15 e 20 mm perfurados no cimento), canal de lama (um canal com largura variável foi formado durante a cimentação da célula em posição quase horizontal, e barita sedimentada (anular, livre de cimento, foi preenchido com uma mistura de água e barita). Concluíram que a combinação dos modos (*crossplot* SLG) permitiu discriminar entre sólido, líquido e gás, e detectar defeitos como *microanulus* (que se agravou sob alta pressão) e canais de lama. O perfil flexural foi mais sensível a materiais de baixa impedância. Defeitos como *channeling* (5, 10, 15mm) ficaram abaixo da resolução do feixe ultrassônico (aproximadamente 1 polegada), sendo detectado apenas o de 20 mm.

Em suma, a análise do estado da arte evidencia que o presente trabalho visa preencher uma lacuna de infraestrutura experimental e metodologia no cenário de pesquisa em avaliação de cimentação *Through-Tubing* (TT). Enquanto estudos precursores, como os de Talberg *et al.* [27] e Liu *et al.* [56], utilizam de aproximações planares ou geometrias simplificadas, onde fenômenos como os modos circunferenciais e a dispersão axial inerente à curvatura dos tubos não são considerados, a bancada desenvolvida nesta dissertação inova ao adotar a geometria cilíndrica em escala real. Além disso, diferentemente da abordagem de Govil *et al.* [37], focada na termodinâmica para validação de microanulares, o projeto aborda a complexidade da assimetria acústica transformando a excentricidade — uma variável tipicamente estocástica em campo — em um parâmetro de controle

mecânico determinístico. Desta forma, a presente bancada estabelece um padrão de referência físico, constituindo uma plataforma robusta para a geração de dados indexados fundamentais para proporcionar a calibração de modelos numéricos avançados e o treinamento de algoritmos de *Machine Learning*.

Assim, no capítulo 3, são apresentados os requisitos e conceitos utilizados para o desenvolvimento do sistema utilizado, bem como o dimensionamento dos equipamentos, componentes e suas principais características.

3

Metodologia da construção da bancada de testes e protótipo de ferramenta

As operações em poços de petróleo implicam um elevado grau de dificuldade técnica e riscos associados, por isso a indústria de O&G por vezes restringe o acesso direto aos poços para a realização de testes experimentais. Nesse sentido, propõe-se a concepção e construção de uma bancada de testes laboratoriais que simule os defeitos na camada de cimento encontrados em poços reais. Esta bancada permitirá a alteração de parâmetros experimentais, tais como tipos de defeitos na cimentação, a presença do *tubing* e a variação da excentricidade do *tubing*. Além disso, propõe-se o desenvolvimento de um protótipo de ferramenta de perfilagem acústica no *tubing* e *through-tubing*. Nesta seção será apresentada a descrição da bancada experimental e os protótipos de ferramenta. No item 3.1 é discutido a visão global do conjunto experimental, no item 3.2 são apresentados os componentes da bancada de teste e suas características, no item 3.3 é apresentado as etapas de montagem da bancada de teste e por fim, no item 3.4 é apresentado o desenvolvimento dos protótipos de ferramenta, apresentando as características e funcionalidades.

3.1

Visão global do conjunto experimental

Por isso, foi desenvolvido um sistema que se baseia no princípio de *pitch-catch*, onde ondas são emitidas por uma fonte e interagem com o meio ao redor e são posteriormente recebidas por um conjunto de receptores. Um dos requisitos do protótipo é a identificação da distância ideal entre a fonte e o receptor para obtenção dos dados acústicos e quantos receptores são necessários para a aquisição. Sendo assim, foi desenvolvido um sistema de translação que permitiu o deslocamento dos receptores ao longo do corpo da ferramenta, a qual possui o transdutor piezoelétrico, chamado de fonte, fixado em sua região inferior permitindo assim, alterar a distância relativa entre emissor e receptores, sem a necessidade de movimentação da fonte.

Assim, os requisitos que nortearam o desenvolvimento deste protótipo laboratorial visaram, acima de tudo, estudar a qualidade dos sinais em função dos parâmetros de projeto, como descrito na Tabela 2.

Tabela 2: Configuração típica de poço para o trabalho da Ferramenta de Perfuração *Through Tubing*.

Parâmetro	Descrição
Arquitetura do poço	Variação de poços desviados, verticais e horizontais; sem presença de completações inteligentes; sem desvios e ramificações (multilaterais)
Pressão	500–5.500psi
Temperatura	Até 120°C
Profundidade do poço	3.500 m (máximo)
Características do fluido	Fluido de completação no anular A; Óleo principalmente do tipo Brent; vários poços com H ₂ S e CO ₂ ; BSW85
Cenário com incrustação potencial	Sim
Cenário com produção de areia potencial	Não
Viscosidade do fluido	Até 40 cP
Taxa de fluxo	Sem fluxo
Metalurgia da coluna de produção	Aço 13 Cromo; Aço carbono; poucos poços com outra metalurgia
Conexão da coluna de produção	VAM TOP, EUE
Equipamento permanente	Packer; PDG (cabo elétrico encapsulado na coluna de produção)
DI da árvore de natal	DI igual entre a árvore de natal seca e a coluna de produção
Coluna de produção (<i>Tubing</i>)	4 ½” – 7”
Revestimento (<i>Casing</i>)	7” – 9 5/8”
Espessura do cimento	1”

Tipos de rocha

Arenito; Calcário; Folhelho; Anidrita; Carbonato

Considerando as informações da Tabela 2, é possível avaliar requisitos que uma ferramenta de *logging* deve atender. Estes requisitos são listados na Tabela 3, apresentada a seguir.

Tabela 3: Requisitos de desempenho de ferramentas de perfilagem.

Parâmetro	Valor
Temperatura Máxima de Operação	125°C
Pressão Máxima de Operação	10.000 psi
Diâmetro da Ferramenta	2 ½” – 3 ½”
Comprimento da Ferramenta	3,5 m
Faixa de Revestimento (<i>Casing</i>)	7” – 13 3/8”
Faixa da Coluna de Produção (<i>Tubing</i>)	4 ½” – 7”
Velocidade Máxima de Perfilagem	6m/min
Tensão de Operação	18 a 150 V
Frequência de Operação	20 a 60 kHz

Contudo, deve-se ressaltar que esses requisitos são estabelecidos para orientar a construção de uma ferramenta apta a operar em condições de campo. Portanto, não se aplicam integralmente ao protótipo laboratorial proposto nesta dissertação. O objetivo do protótipo aqui desenvolvido é, primariamente, possibilitar a análise dos parâmetros obtidos através dos sinais acústicos gerados pela fonte e aquisitados pelos receptores, e o comportamento da ferramenta na bancada de testes, utilizando arranjos experimentais simplificados e produzidos em ambiente controlado.

3.2

Bancada de teste

Devido a limitação de espaço físico e altura máxima da ponte rolante de aproximadamente 6 metros de altura útil, que serviu para içamento, manutenção e montagem da bancada experimental, no laboratório LSFO (Laboratório de Sensores a Fibra Óptica) da PUC-Rio, limitou-se o comprimento dos tubos da bancada a 4

metros, resultando em uma altura total da estrutura de 4,2 metros, conforme ilustrado na Figura 12.

A bancada experimental consiste em três tubos de aço que são o revestimento externo (*outer casing*), o revestimento (*casing*) e a coluna de produção (*tubing*). A bancada possuiu um *design* modular, o que permitiu o desenvolvimento de seções experimentais distintas: uma utilizando *casing* de 7" e outra com *casing* de 9 5/8". Ambas as configurações permitem que o *tubing* de 4 1/2" seja deslocado, possibilitando assim a montagem de arranjos concêntricos e com diferentes níveis de excentricidade, ou mesmo com a ausência do *tubing*. Essas configurações visam reproduzir as estruturas básicas de um poço de petróleo, viabilizando que uma camada de cimento, com ou sem defeitos, seja produzida no anular (espaço entre os tubos) formado entre o *casing* e o *outer casing*. Todo este arranjo tubular é montado sobre uma estrutura metálica robusta, projetada para evitar o tombamento do conjunto e garantir sua estabilidade.

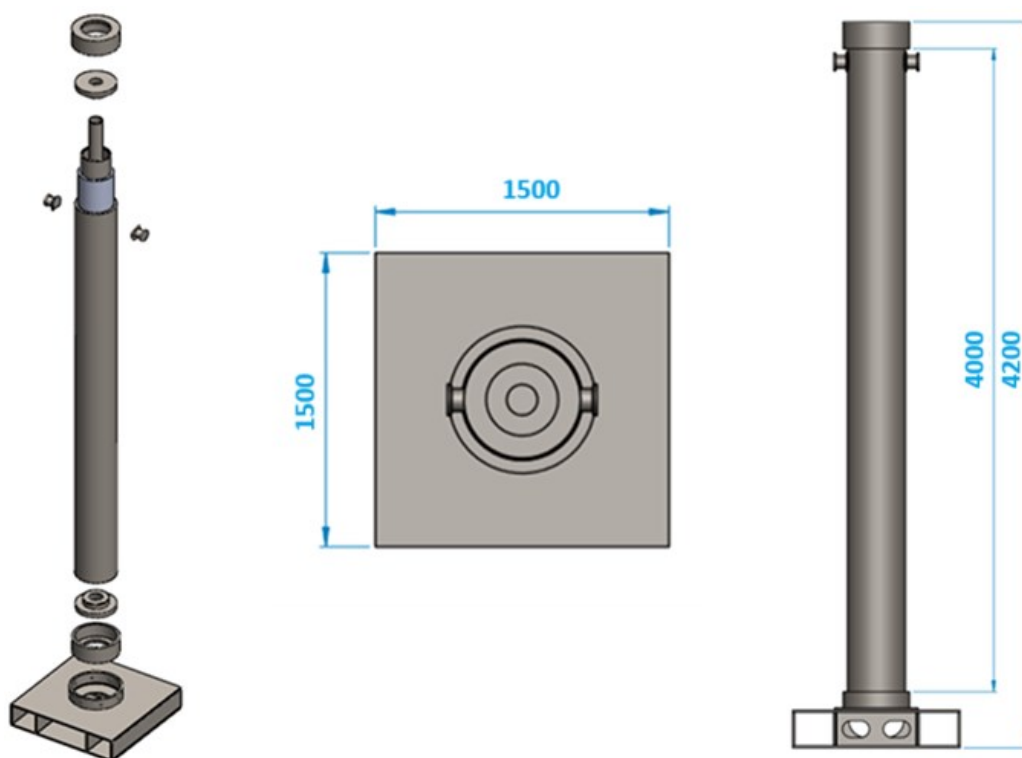


Figura 12: Dimensões totais da bancada de teste.

É importante destacar que a formação rochosa do poço foi substituída pelo tubo externo de 13 3/8" preenchido com água, cuja intenção foi atenuar suficientemente as ondas que se propagam na direção da formação. Esta alteração

foi motivada para viabilizar a execução dos experimentos, uma vez que para realizar a troca dos diferentes casos de testes seria muito custoso e demandaria de espaço indisponível no laboratório.

A Figura 13 ilustra o posicionamento da ferramenta de perfilagem na bancada de teste, onde o arranjo de tubos é fixado a base quadrada de sustentação no chão.

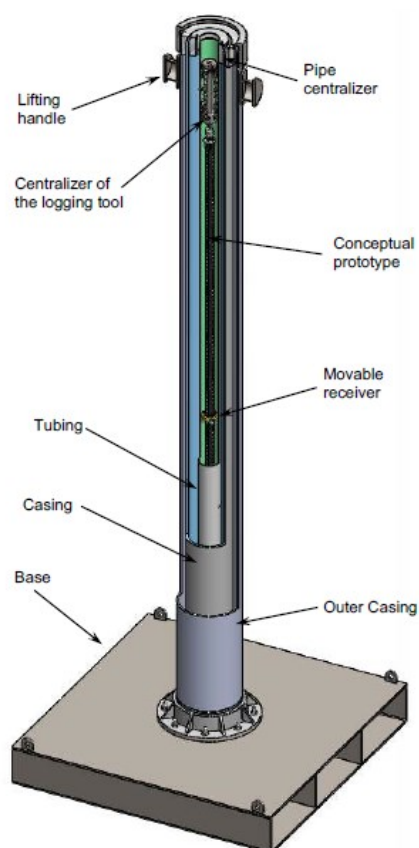


Figura 13: Posicionamento da ferramenta de perfilagem na bancada de teste.

Acima da base, estão montados concentricamente o *outer casing*, o *casing* e o *tubing*. Dentro da coluna de produção está o protótipo conceitual da ferramenta de perfilagem, posicionado concentricamente por um par de centralizadores. O munhão de içamento e um centralizador de *casing-tubing* se localizam na parte superior.

A bancada de testes foi projetada para simular diversas condições de poço [57] sendo confeccionada em quatro configurações principais para o espaço anular entre o *casing* e o *outer casing*, aplicáveis tanto ao *casing* de 7" quanto ao de 9 5/8", conforme Figura 14. Os resultados e análises de cada construção são apresentados no Capítulo 4. Estas configurações são:

- Anular preenchido com fluido (F): O primeiro arranjo consistiu no casing sem cimentação, com o espaço anular completamente preenchido por fluido (água). Este cenário teve como objetivo principal o teste e a parametrização inicial dos transdutores e dos equipamentos eletrônicos que compõem o sistema de excitação acústica.
- Cimentação de boa qualidade (C): O segundo arranjo foi desenvolvido para representar uma condição de cimentação considerada ideal, sem a introdução intencional de quaisquer defeitos, servindo como referência de uma selagem hidráulica perfeita.
- Defeito de canalização (CH): No terceiro arranjo, para simular o defeito de canalização, foram posicionadas mangueiras de borracha com 6 mm de diâmetro longitudinalmente no interior do molde de papelão (que define o espaço anular) antes da concretagem do cimento.
- Cimento de baixa qualidade com múltiplos defeitos (CL): Por fim, no quarto arranjo, buscou-se simular um cimento de baixa qualidade através da incorporação de diferentes tipos de defeitos. Estes incluíram canais, criados pela utilização de mangueiras com 10 mm de diâmetro; vazios, simulados com a inserção de pequenos pedaços de isopor no anular; e um microanular, induzido pela presença de uma fina camada de plástico envolta no *casing* até metade de sua extensão antes da cimentação.

Adicionalmente à variação da condição de cimentação do *casing*, para cada uma dessas quatro configurações do anular, também era alterado o nível de excentricidade ou a própria presença do *tubing*. Os arranjos possíveis para o *tubing* foram:

- NT (sem tubo, do inglês *No Tubing*): Configuração sem a presença do *tubing*.
- NE (sem excentricidade, do inglês *Non-Eccentric*): Configuração com o *tubing* posicionado concentricamente em relação ao *casing*.

- E1 (excentricidade de nível 1): Configuração com o *tubing* apresentando um deslocamento que resulta em uma excentricidade média de 48,79%.
- E2 (excentricidade de nível 2): Configuração com o *tubing* posicionado de forma a tocar a parede interna do *casing*, representando a excentricidade máxima possível.

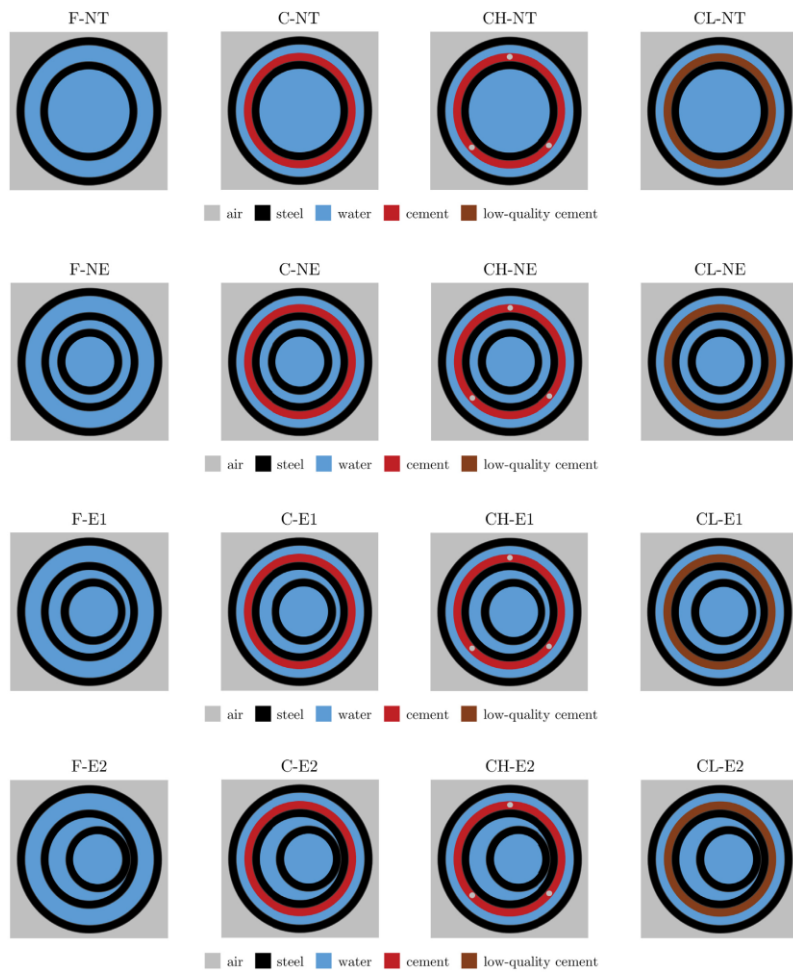


Figura 14: Arranjo de configurações [57].

A Figura 15 apresenta as dimensões dos tubos e configurações.

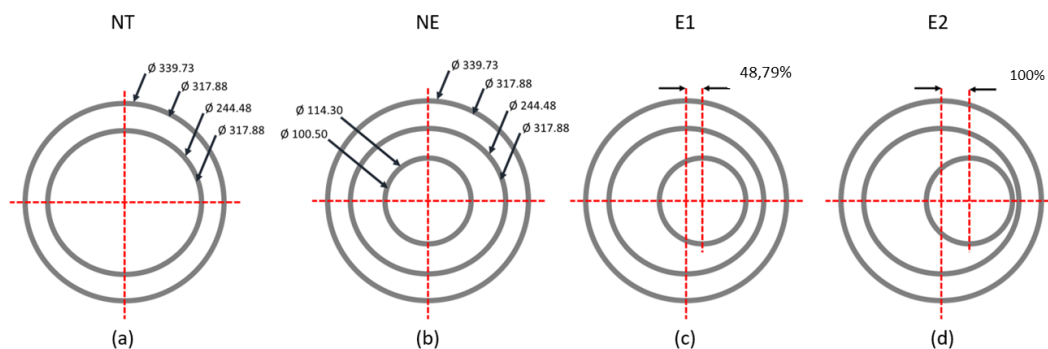


Figura 15: Excentricidades e dimensões dos *casings*.

Todas as configurações de *casing* (7" ou 9 5/8") permitem a variação da excentricidade do *tubing*. A excentricidade relativa percentual é definida como:

$$e_{\%} = 100 \frac{d}{(D_2 - D_1)/2}$$

Sendo d o deslocamento do eixo central do *tubing* em relação ao do *casing*, enquanto D_1 e D_2 são, respectivamente, os diâmetros externo e interno do *tubing* e *casing*. A Tabela 4 apresenta as configurações de excentricidades possíveis.

Tabela 4: Deslocamento percentual da excentricidade.

Rótulo	<i>Casing</i> 9 5/8"	<i>Casing</i> 7"
NE	0	0
E1	48,79%	34,57%
E2	100%	100%
NT	0	0

Os valores de E1 não foram propositais e sim para facilitar o processo de usinagem dos alojamentos dos tubos.

3.2.1

Fabricação do *setup* de testes

Para a construção da bancada de testes experimentais conduziu-se um estudo dos principais requisitos do sistema, abordando os seguintes aspectos:

- Análise das limitações físicas do laboratório: Esta análise permitiu a definição das dimensões máximas para a bancada e para a ferramenta de testes, adequando o projeto ao espaço disponível e às capacidades logísticas.

- Levantamento dos equipamentos auxiliares para movimentação e montagem: A avaliação da infraestrutura existente foi crucial para determinar as soluções viáveis para o desenvolvimento, montagem e manuseio dos componentes e sistemas da bancada.
- Especificação da metalurgia e dimensões nominais dos tubos: Os materiais e dimensões foram selecionados em conformidade com os padrões e práticas da indústria de O&G, visando a representatividade dos ensaios.
- Definição da estrutura da base de sustentação: Considerou-se o local de instalação e a viabilidade de fixar a base ao chão para garantir a estabilidade necessária.
- Projeto do sistema de fixação dos tubos à base: Foi desenvolvida uma interface (cap inferior) específica para assegurar a correta verticalização e o alinhamento dos tubos, o dimensionamento é apresentado no capítulo 3.2.1.2.
- Dimensionamento das conexões roscadas: Especificamente, o dimensionamento da rosca entre a interface que será fixada à base e o *outer casing* foi calculado para garantir a integridade estrutural, assegurar a correta verticalização e o alinhamento dos tubos, apresentado no capítulo 3.2.1.2.
- Estabelecimento do sistema de içamento: Foram planejados os procedimentos e os recursos necessários para o içamento seguro do conjunto da bancada.
- Garantia do alinhamento e concentricidade: Definiram-se os métodos para assegurar o preciso alinhamento e a concentricidade dos tubos durante a montagem.
- Mecanismo para alteração da excentricidade do *tubing*: Foi concebido um sistema que permitisse a variação controlada da posição do *tubing*.
- Idealização e metodologia de aplicação dos defeitos: Foram mimetizadas, de maneira controlada e representativa, os defeitos comumente encontrados na cimentação de poços reais [20], reconhecendo a complexidade desta etapa.
- Planejamento do acesso ao *setup* e da movimentação da ferramenta: Considerou-se a necessidade de acesso à parte superior da bancada para

ajustes, como a movimentação do *tubing*, e para a manutenção da ferramenta de perfilagem.

A partir da consolidação e análise desses requisitos, iniciou-se a construção da bancada de testes, cujos detalhes serão descritos nos capítulos subsequentes.

3.2.1.1

Tubos

Com base em um nas bancadas de teste analisadas, constatou-se que os poços destinados a abandono em curto prazo utilizam, majoritariamente, *casings* de 7" e 9 5/8", com *tubing* de 4 1/2". Diante dessa informação, decidiu-se adquirir tubos que replicassem fielmente os requisitos de diâmetro externo, interno e *drift* (diâmetro interno mínimo) encontrados em poços de petróleo reais, em conformidade com a norma API 5CT [58], conforme detalhado na Tabela 5. Sendo assim, foram adquiridos 6 tubos, ilustrados da Figura 16, sendo OD, o diâmetro externo, do inglês *Output Diameter*, e I.D, o diâmetro interno, do inglês *Internal Diameter*. As especificações estão ilustradas a seguir:

Tabela 5: Características dos tubos da bancada de teste.

OD (in)	lb/ft (in)	Drift (in)	I.D (in)	Grau	Quantidade
13 3/8	61,0	12,359	12,515	K55	1
9 5/8	53,5	8,379	8,535	Q125	3
7	32,0	5,969	6,094	VM110	1
4 1/2	12,6	3,833	3,958	P110	1



Figura 16: Tubos no laboratório.

3.2.1.2

Base de sustentação

Para o desenvolvimento da base de sustentação da bancada de testes experimentais, diversos requisitos críticos foram avaliados para garantir sua funcionalidade e segurança em laboratório.

A estrutura da base, detalhada na Figura 17 é constituída por duas chapas de aço, que servem para estabilizar o conjunto e aumentar sua robustez geral. Um par de chapas de aço menores é soldado a estas chapas largas, a seção mais interna possui um recorte projetado para permitir o acesso tanto para o preenchimento da bancada com fluido a partir extremidade inferior, quanto o acesso a futuras linhas de controle de pressão e fluxo, que poderiam ser localizadas na parte interna do *tubing* e do anular, embora tais linhas não sejam utilizadas no escopo do presente estudo. Adicionalmente, olhais de içamento foram incorporados à chapa superior da base para auxiliar no seu transporte e manuseio.



Figura 17: Ilustração da base de sustentação com acesso na sua parte inferior.

3.2.1.2.1

Dimensionamento da base de sustentação

Devido ao comprimento de 4 metros dos tubos e ao peso total do conjunto montado, aproximadamente 1200 kg (11.772 N), foi realizada uma análise de risco. Esta análise incluiu o cálculo e dimensionamento da base da bancada para prevenir o tombamento, conforme teoria apresentada no Capítulo 2.6. Como premissa de segurança, adotou-se a aplicação de uma força horizontal de 1000 N no topo do sistema, correspondente ao peso de um operador em uma eventual situação de desequilíbrio ou queda ao operar na parte superior da estrutura. A Figura 18 ilustra as forças e reações na bancada, sendo a seta rosa a aplicação da força lateral, a seta verde o ponto de fixação e a seta vermelha o centro de gravidade.

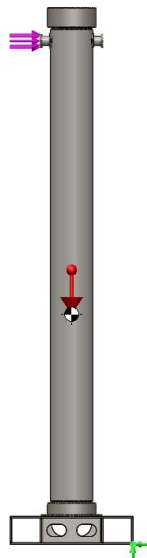


Figura 18: Forças e reações atuantes na bancada.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros utilizados para o dimensionamento dos esforços na bancada de teste.

Tabela 6: Parâmetros da bancada de teste.

Parâmetro	Valor
Peso total	11772 N
Força lateral	1000 N
Distância Força-Base	4,2 m
Altura do centro de gravidade	1,875 m

Através do balanço da equação de momento, obtém-se a largura mínima da base L_B :

$$\begin{aligned}
 F_L \cdot d &= P_T \cdot \frac{L_B}{2} \\
 1000 \cdot 4200 &= 11772 \cdot \frac{L_B}{2} \\
 4200000 &= 5886 \cdot L_B \\
 L_B &= \frac{4200000}{5886} \approx 713,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Aplicando fator de segurança 2, obtém-se a largura adotada L_A :

$$FS = \frac{\text{Largura Adotada}}{\text{Largura Calculada}}$$

$$2 = \frac{L_A}{713,5} = 1427 \text{ mm}$$

Sendo assim, definiu-se o comprimento da base em 1500 mm, assegurando que a estrutura permanecesse estável mesmo sob as condições adversas, atendendo também as limitações de espaço do laboratório.

3.2.1.2.2

Dimensionamento dos parafusos de fixação cap inferior – Base de sustentação

Conforme ilustrado na Figura 19, o conjunto de tubos é fixado à base por meio de parafusos e porcas inseridos através do flange do cap inferior, fixando assim o conjunto na bancada de teste. A escolha por este método possibilita a alteração das configurações de testes, por exemplo, para diferentes diâmetros de *casing* ou arranjos de defeitos, sem a necessidade de movimentar ou modificar a estrutura da base. Operações como a movimentação simples do *tubing* e a manutenção do sistema de deslocamento da ferramenta são realizadas pela parte superior do conjunto. Essas atividades podem gerar esforços cisalhantes e de momento na interface entre o tubo e a base de sustentação.

Considerando o risco inerente, foi realizado o dimensionamento dos parafusos de fixação para garantir a integridade e a correta ancoragem do sistema.

Considerando os parâmetros listados na Tabela 6, e utilizando 4 parafusos M16 classe 10.9, tem-se por norma [55] que a área resistente do parafuso é $Ar_p = 1,57 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, assim:

n (número de parafusos): 4

Ar_p (área resistente do parafuso): $1,57 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Limite de escoamento (classe 10.9): 900Mpa

Calculando o momento atuante:

$$M = F_L \cdot d = 1000 \times 4,2 = 4.200 \text{ Nm}$$

Força total de tração devido ao momento:

$$F_{total} = \frac{M}{r} = \frac{4200}{0,20} = 21.000 \text{ N}$$

Onde $r = 0,20 \text{ m}$ é a distância entre o parafuso no flange e o centro da bancada.

Força por parafuso:

$$F_{parafuso} = \frac{F_{total}}{n} = \frac{21000}{4} = 5.250 \text{ N}$$

Tensão de tração σ :

$$\sigma = \frac{F_{parafuso}}{Ar_p} = \frac{5.250}{1,57 \times 10^{-4}} = 33,44 \text{ Mpa}$$

Tensão de cisalhamento τ :

$$\tau = \frac{F_L/n}{Ar_p} = \frac{(1000/4)}{1,57 \times 10^{-4}} = 1,59 \text{ Mpa}$$

Tensão equivalente (Von Mises) σ_{eq} :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{33,44^2 + 31,59^2} = 33,55 \text{ Mpa}$$

Como a tensão equivalente calculada permanece inferior ao limite de escoamento do material, a escolha do parafuso M16 classe 10.9 mostra-se adequada para garantir a integridade estrutural da fixação.

Além disso, para otimizar a montagem e alinhamento dos tubos na base, a chapa superior e flange foram projetados com oito furos oblongos equidistantes, proporcionando flexibilidade para o posicionamento.

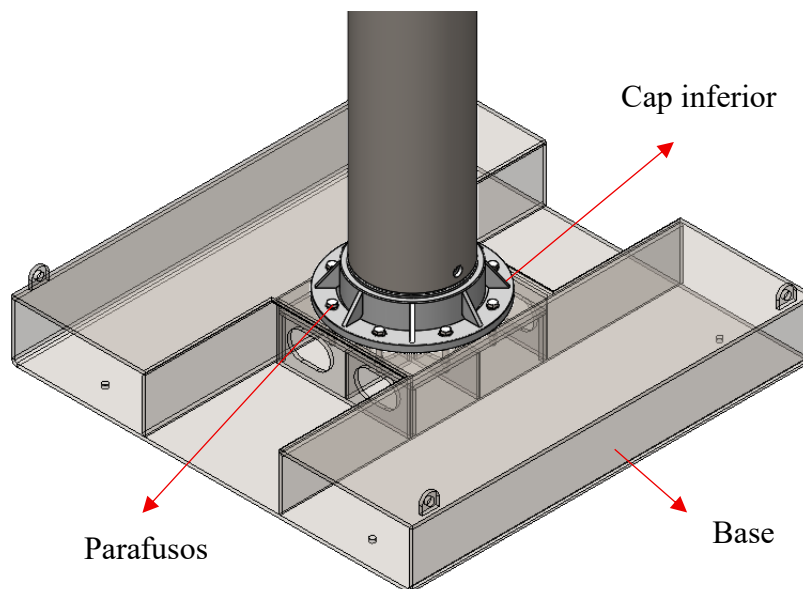


Figura 19: Fixação da bancada de teste na base.

3.2.1.2.3

Dimensionamento rosca do cap inferior e *outer casing*

O cap inferior foi projetado como um componente multifuncional. Sua principal função é estabelecer a união estrutural entre a base de sustentação da bancada e o *outer casing*. Esta conexão com a base é assegurada por um conjunto de parafusos que fixam o flange, soldado ao corpo do cap, à estrutura de sustentação. Por sua vez, a ligação do cap inferior ao *outer casing* é realizada por rosqueamento, o que garante uma conexão mecânica robusta e segura, conforme ilustrado na Figura 20. Para fins de padronização, o cap superior utilizará o mesmo padrão de rosca dimensionado para o cap inferior.

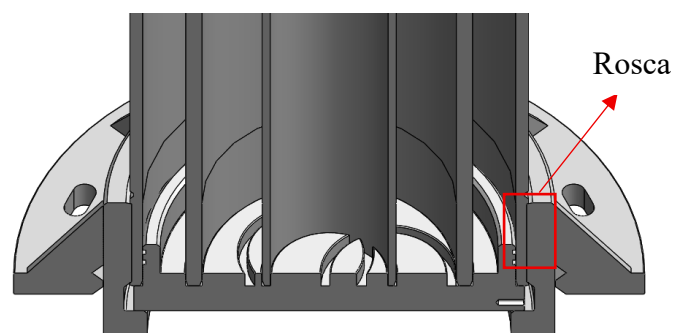


Figura 20: Montagem do cap inferior - Plug Inferior - Conjunto de tubos.

Para evitar qualquer enfraquecimento da região rosqueada no tubo, optou-se pelo padrão de rosca *STUB ACME*, que possui filetes em perfil trapezoidal, amplamente difundida em equipamentos de poço. O dimensionamento completo desta rosca foi realizado seguindo Oberg et al. [59] e em conformidade com a norma ASME/ANSI B1.8-1988 (R2006) [60]. Na Figura 21, são apresentadas as informações para determinação dos parâmetros da rosca:

**ANSI General Purpose Acme Thread Form ASME/ANSI B1.5-1997 (R2009),
and Stub Acme Screw Thread Form ASME/ANSI B1.8-1988 (R2006)**

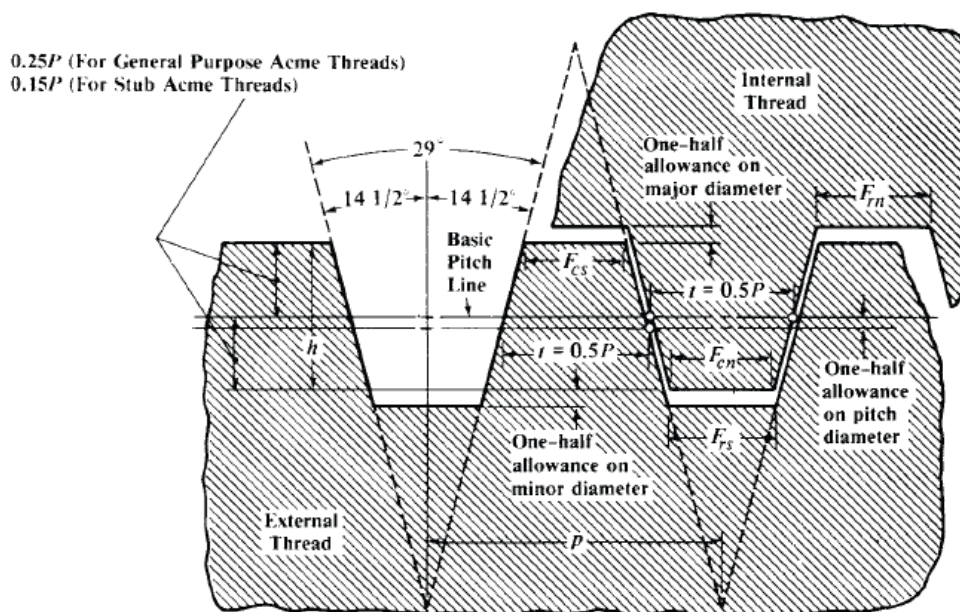


Fig. 1. General Purpose and Stub Acme Thread Forms

Formulas for Basic Dimensions of General Purpose and Stub Acme Screw Threads

General Purpose	Stub Acme Threads
Pitch = $P = 1 \div \text{No. threads per inch, } n$	Pitch = $P = 1 \div \text{No. threads per inch, } n$
Basic thread height $h = 0.5P$	Basic thread height $h = 0.3P$
Basic thread thickness $t = 0.5P$	Basic thread thickness $t = 0.5P$
Basic flat at crest $F_{cn} = 0.3707P$ (internal thread)	Basic flat at crest $F_{cn} = 0.4224P$ (internal thread)
Basic flat at crest $F_{cs} = 0.3707P - 0.259 \times$ (pitch dia. allowance on ext. thd.)	Basic flat at crest $F_{cs} = 0.4224P - 0.259 \times$ (pitch dia. allowance on ext. thread)
$F_{rn} = 0.3707P - 0.259 \times$ (major dia. allowance on internal thread)	$F_{rn} = 0.4224P - 0.259 \times$ (major dia. allowance on internal thread)
$F_{rs} = 0.3707P - 0.259 \times$ (minor dia. allowance on ext. thread – pitch dia. allowance on ext. thread)	$F_{rs} = 0.4224P - 0.259 \times$ (minor dia. allowance on ext. thread – pitch dia. allowance on ext. thread)

Figura 21: Cálculo da rosca do cap inferior/Superior e *outer casing* [59].

O passo (*pitch*) e fios por polegada (thds. per inch) foram selecionados da tabela apresentada na Figura 22.

Table 13. American National Standard Stub Acme Screw Thread Form — Basic Dimensions ASME/ANSI B1.8-1988 (R2006)

Thds. per Inch ^a <i>n</i>	Pitch, $P = 1/n$	Height of Thread (Basic), $0.3P$	Total Height of Thread, $0.3P + \frac{1}{2}$ allowance ^b	Thread Thickness (Basic), $P/2$	Width of Flat	
					Crest of Internal Thread (Basic), $0.4224P$	Root of Internal Thread, $0.4224P - 0.259$ $\times$ allowance ^b
16	0.06250	0.01875	0.0238	0.03125	0.0264	0.0238
14	0.07143	0.02143	0.0264	0.03571	0.0302	0.0276
12	0.08333	0.02500	0.0300	0.04167	0.0352	0.0326
10	0.10000	0.03000	0.0400	0.05000	0.0422	0.0370
9	0.11111	0.03333	0.0433	0.05556	0.0469	0.0417
8	0.12500	0.03750	0.0475	0.06250	0.0528	0.0476
7	0.14286	0.04285	0.0529	0.07143	0.0603	0.0551
6	0.16667	0.05000	0.0600	0.08333	0.0704	0.0652
5	0.20000	0.06000	0.0700	0.10000	0.0845	0.0793
4	0.25000	0.07500	0.0850	0.12500	0.1056	0.1004
3½	0.28571	0.08571	0.0957	0.14286	0.1207	0.1155
3	0.33333	0.10000	0.1100	0.16667	0.1408	0.1356
2½	0.40000	0.12000	0.1300	0.20000	0.1690	0.1638
2	0.50000	0.15000	0.1600	0.25000	0.2112	0.2060
1½	0.66667	0.20000	0.2100	0.33333	0.2816	0.2764
1⅓	0.75000	0.22500	0.2350	0.37500	0.3168	0.3116
1	1.00000	0.30000	0.3100	0.50000	0.4224	0.4172

Figura 22: Dimensões básicas rosca *Stub Acme* [59].

A Tabela 7 apresenta os parâmetros selecionados como input para dimensionamento das rocas de fixação cap inferior/superior – *outer casing*.

Tabela 7: Parâmetros selecionados para fixação cap inferior - *outer casing*.

Input das características	
D= Basic Major Dia. (in.)	13,375
Fios por Inch.	5
Pitch	0,2
Class	2

A partir da determinação desses valores, é realizado o cálculo dos diâmetros básicos e dimensões limites, conforme Figura 23.

Table 14a. American National Standard Stub Acme Single-Start Screw Threads — Formulas for Determining Diameters ASME/ANSI B1.8-1988 (R2006)

D = Basic Major Diameter and Nominal Size in Inches D_2 = Basic Pitch Diameter = $D - 0.3P$ D_1 = Basic Minor Diameter = $D - 0.6P$	
No.	External Threads (Screws)
1	Major Dia., Max = D .
2	Major Dia., Min. = D minus $0.05P$.
3	Pitch Dia., Max. = D_2 minus allowance from the appropriate Class 2G column, Table 4.
4	Pitch Dia., Min. = Pitch Dia., Max. (Formula 3) minus Class 2G tolerance from Table 5.
5	Minor Dia., Max. = D_1 minus 0.020 for 10 threads per inch and coarser and 0.010 for finer pitches.
6	Minor Dia., Min. = Minor Dia., Max. (Formula 5) minus Class 2G pitch diameter tolerance from Table 5.
Internal Threads (Nuts)	
7	Major Dia., Min. = D plus 0.020 for 10 threads per inch and coarser and 0.010 for finer pitches.
8	Major Dia., Max. = Major Dia., Min. (Formula 7) plus Class 2G pitch diameter tolerance from Table 5.
9	Pitch Dia., Min. = $D_2 = D - 0.3P$
10	Pitch Dia., Max. = Pitch Dia., Min. (Formula 9) plus Class 2G tolerance from Table 5.
11	Minor Dia., Min. = $D_1 = D - 0.6P$
12	Minor Dia., Max = Minor Dia., Min. (Formula 11) plus $0.05P$.

Figura 23 – Fórmulas para determinação das dimensões limites [59].

A Tabela 8: apresenta as dimensões básicas da rosca.

Tabela 8: Diâmetros básicos da rosca.

Diâmetros básicos	Dimensões (in.)
D2= Basic Pitch Dia.	13,315
D1= Basic Minor Dia.	13,255
Pitch Dia. Allowances	0,0292
Pitch Dia. Tolerances - (Dia. Increment + Pitch Increment)	0,0354

A partir da determinação das dimensões e diâmetros básicos, é possível obter os valores para as roscas internas e externas. As Figura 24 e Figura 25 apresentam as constantes a serem considerados no cálculo:

Table 4. American National Standard General Purpose Acme Single-Start Screw Threads — Pitch Diameter Allowances ASME/ANSI B1.5-1988

Nominal Size Range ^a		Allowances on External Threads ^b			Nominal Size Range ^a		Allowances on External Threads ^b		
Above	To and Including	Class 2G ^c , $0.008\sqrt{D}$	Class 3G, $0.006\sqrt{D}$	Class 4G, $0.004\sqrt{D}$	Above	To and Including	Class 2G ^c , $0.008\sqrt{D}$	Class 3G, $0.006\sqrt{D}$	Class 4G, $0.004\sqrt{D}$
0	$\frac{3}{16}$	0.0024	0.0018	0.0012	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{16}$	0.0098	0.0073	0.0049
$\frac{3}{16}$	$\frac{5}{16}$	0.0040	0.0030	0.0020	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{8}$	0.0105	0.0079	0.0052
$\frac{5}{16}$	$\frac{7}{16}$	0.0049	0.0037	0.0024	$\frac{1}{8}$	$\frac{2}{8}$	0.0113	0.0085	0.0057
$\frac{7}{16}$	$\frac{9}{16}$	0.0057	0.0042	0.0028	$\frac{2}{8}$	$\frac{3}{8}$	0.0120	0.0090	0.0060
$\frac{9}{16}$	$\frac{11}{16}$	0.0063	0.0047	0.0032	$\frac{3}{8}$	$\frac{2}{8}$	0.0126	0.0095	0.0063
$\frac{11}{16}$	$\frac{13}{16}$	0.0069	0.0052	0.0035	$\frac{2}{8}$	$\frac{2}{8}$	0.0133	0.0099	0.0066
$\frac{13}{16}$	$\frac{15}{16}$	0.0075	0.0056	0.0037	$\frac{2}{8}$	$\frac{3}{4}$	0.0140	0.0105	0.0070
$\frac{15}{16}$	$1\frac{1}{16}$	0.0080	0.0060	0.0040	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	0.0150	0.0112	0.0075
$1\frac{1}{16}$	$1\frac{3}{16}$	0.0085	0.0064	0.0042	$\frac{3}{4}$	$\frac{4}{4}$	0.0160	0.0120	0.0080
$1\frac{3}{16}$	$1\frac{5}{16}$	0.0089	0.0067	0.0045	$\frac{4}{4}$	$\frac{4}{4}$	0.0170	0.0127	0.0085
$1\frac{5}{16}$	$1\frac{7}{16}$	0.0094	0.0070	0.0047	$\frac{4}{4}$	$5\frac{1}{2}$	0.0181	0.0136	0.0091

Figura 24: Parâmetros geométricos fundamentais de roscas internas e externas, ilustrando as tolerâncias e folgas diametrais [59].

Table 5. American National Standard General Purpose Acme Single-Start Screw Threads — Pitch Diameter Tolerances ASME/ANSI B1.5-1988

Nom. Dia., ^a <i>D</i>	Class of Thread			Nom. Dia., ^a <i>D</i>	Class of Thread		
	2G ^b	3G	4G		2G ^b	3G	4G
	Diameter Increment				Diameter Increment		
	$0.006\sqrt{D}$	$0.0028\sqrt{D}$	$0.002\sqrt{D}$		$0.006\sqrt{D}$	$0.0028\sqrt{D}$	$0.002\sqrt{D}$
$\frac{1}{4}$	.00300	.00140	.00100	$1\frac{1}{2}$	.00735	.00343	.00245
$\frac{5}{16}$	.00335	.00157	.00112	$1\frac{3}{4}$	.00794	.00370	.00265
$\frac{3}{8}$	.00367	.00171	.00122	2	.00849	.00396	.00283
$\frac{7}{16}$	.00397	.00185	.00132	$2\frac{1}{4}$	.00900	.00420	.00300
$\frac{1}{2}$	.00424	.00198	.00141	$2\frac{1}{2}$	.00949	.00443	.00316
$\frac{5}{8}$	.00474	.00221	.00158	$2\frac{3}{4}$	.00995	.00464	.00332
$\frac{3}{4}$	.00520	.00242	.00173	3	.01039	.00485	.00346
$\frac{7}{8}$	.00561	.00262	.00187	$3\frac{1}{2}$	.01122	.00524	.00374
1	.00600	.00280	.00200	4	.01200	.00560	.00400
$1\frac{1}{8}$	.00636	.00297	.00212	$4\frac{1}{2}$	.01273	.00594	.00424
$1\frac{1}{4}$	.00671	.00313	.00224	5	.01342	.00626	.00447
$1\frac{3}{8}$	.00704	.00328	.00235	...	...	...	...
Thds. per Inch ^c , <i>n</i>	Class of Thread			Thds. per Inch ^c , <i>n</i>	Class of Thread		
	2G ^b	3G	4G		2G ^b	3G	4G
	Pitch Increment				Pitch Increment		
	$0.030\sqrt{1/n}$	$0.014\sqrt{1/n}$	$0.010\sqrt{1/n}$		$0.030\sqrt{1/n}$	$0.014\sqrt{1/n}$	$0.010\sqrt{1/n}$
16	.00750	.00350	.00250	4	.01500	.00700	.00500
14	.00802	.00374	.00267	3	.01732	.00808	.00577
12	.00866	.00404	.00289	$2\frac{1}{2}$	.01897	.00885	.00632
10	.00949	.00443	.00316	2	.02121	.00990	.00707
8	.01061	.00495	.00354	$1\frac{1}{2}$	.02449	.01143	.00816
6	.01225	.00572	.00408	$1\frac{1}{3}$	.02598	.01212	.00866
5	.01342	.00626	.00447	1	.03000	.01400	.01000

Figura 25: Representação esquemática das zonas de tolerância e folgas entre roscas externas e internas [59].

Substituindo os valores conforme apresentado na Figura 23 – Fórmulas para determinação das dimensões limites e Figura 24, obtém-se os valores para o diâmetro da rosca interna do cap inferior e superior, apresentados na Tabela 9. Os valores para o diâmetro da rosca externa do *outer casing* são apresentados na Tabela 10.

Tabela 9: Dimensões rosca cap inferior.

Rosca cap inferior/superior	Dimensões (in.)
Major Dia. Min	340,23
Major Dia. Max	341,13
Pitch Dia. Min	338,20
Pitch Dia. Max	339,10
Minor Dia. Min	336,68
Minor Dia. Max	336,93

A Tabela 10 apresenta as dimensões obtidas para a rosca do *outer casing*:

Tabela 10: Dimensões rosca *outer casing*.

Rosca Outer Casing	Dimensões (in.)
Major Dia. Max	339,72
Major Dia. Min	339,47
Pitch Dia. Max	337,46
Pitch Dia. Min	336,56
Minor Dia. Max	336,17
Minor Dia. Min	335,27

Para a determinação do comprimento de engajamento (L_e) da rosca *Stub Acme*, definido no capítulo 2.6, considerou-se o cenário crítico de carregamento da bancada. O cálculo foi realizado utilizando os valores apresentado na Tabela 6 e Tabela 7.

A força axial equivalente (F_{eq}) que tende a separar a conexão foi calculada considerando a superposição do esforço de tração direto e a reação devido ao momento de tombamento, conforme a aproximação conservadora para conexões flangeadas/roscadas:

$$F_{eq} = P_T + \frac{4 \cdot (F_L \cdot H)}{d_m}$$

Substituindo os valores de projeto obtém-se:

$$F_{eq} = 61.447N$$

O cap inferior foi fabricado em aço SAE1045, assumindo o limite (conservador) de escoamento do material (S_y) de 310 *Mpa* e adotando fator de segurança de 2, temos a tensão admitida (σ_{adm}) de 155 *Mpa*.

Substituindo F_{eq} e σ_{adm} obtemos:

$$L_{\min} = \frac{61.447}{\pi \cdot 338,2 \cdot 155 \cdot 0,3} \approx 1,24 \text{ mm}$$

Embora o cálculo de tensão admissível indicasse que um comprimento de engajamento mínimo de aproximadamente 1,3 *mm* seria suficiente para suportar as cargas axiais, tal dimensão é inviável do ponto de vista construtivo, pois como o passo da rosca é 0,2 polegadas ($\approx 5,08 \text{ mm}$), isso representa menos de um passo de metade de uma volta.

Portanto, o comprimento de engajamento de projeto foi definido em $L_e = 100 \text{ mm}$. Esta dimensão foi selecionada para atender a dois critérios fundamentais: Garantir o acoplamento de aproximadamente 20 filetes de rosca completos, assegurando redundância e distribuição uniforme de carga e prover rigidez suficiente à conexão para auxiliar no alinhamento vertical do tubo, minimizando deflexões angulares na base.

Nesta configuração, a pressão de contato atuante nos filetes é de apenas, teoricamente, 1,93 *MPa*, oferecendo uma ampla margem de segurança em relação à falha do material.

3.2.1.3

Componentes da bancada de testes

O plug inferior, mostrado na Figura 26, desempenha um papel vital no posicionamento preciso dos tubos internos. Ele serve como alojamento para o *casing* de 7" ou 9 5/8" - cada configuração possui um Plug específico - e para o *tubing*, sendo fundamental para estabelecer e manter a concentricidade e permitir a variação da excentricidade desejada do *tubing* em relação ao *casing* nas diferentes

configurações de teste. A vedação eficaz do sistema contra vazamentos de fluido é assegurada por meio de O-rings posicionados neste plug.

No presente trabalho, como os furos originalmente destinados às tomadas de pressão não foram utilizados, foram instaladas conexões do tipo tampão para garantir a vedação do sistema nesses pontos.



Figura 26: Plug inferior 7".

Na extremidade superior da bancada, foram empregados um par de centralizadores fabricados em nylon, sendo um deles posicionado no anular entre o *outer casing* e o *casing*, e o outro no anular entre o *casing* e *tubing*, conforme Figura 27. A escolha do nylon visa minimizar o atrito e evitar danos aos tubos. Inicialmente o centralizador interno (*casing-tubing*) foi idealizado para ser inteiriço, porém, com o andamento do projeto e sucessíveis montagens, verificou-se que a retirada do centralizador *tubing-casing* seria facilitada se o componente pudesse ser removido em duas etapas, sendo assim, optou-se por cortá-lo ao meio, facilitando significativamente sua montagem e utilização para alteração das configurações de excentricidade.

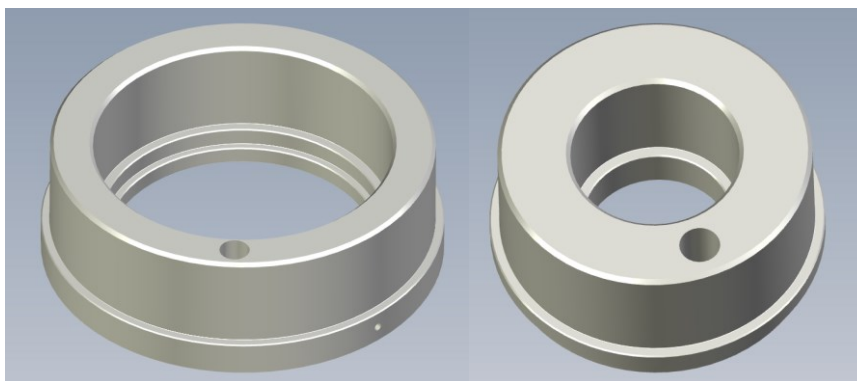


Figura 27: À esquerda o plug anular *outer casing* e à direita plug anular *casing*. Plug inferior 7".

O cap superior cumpre a função de fechamento da parte superior do sistema de tubos, mostrado na Figura 28. Ele é projetado para servir como interface e suporte para a ferramenta de perfilagem acústica, permitindo sua inserção e o acoplamento do sistema de movimentação. Na parte superior do cap são fixados os sistemas de roldanas e o tripé de suporte do segundo protótipo de ferramenta.



Figura 28: Cap Superior. Plug inferior 7".

O tripé de suporte foi empregado como estrutura de apoio para o segundo protótipo de ferramenta de perfilagem. Este sistema é formado por perfis estruturais dobrados, fixados a uma chapa metálica central que possui uma perfuração em seu centro. A chapa também integra uma chave ótica de fim de curso em sua face inferior e uma roldana em sua face superior. O conjunto do tripé é montado sobre o cap superior, conforme Figura 29 e Figura 30.

O sistema de movimentação do primeiro protótipo é apresentado no capítulo 3.4.2. A movimentação do segundo protótipo é realizada através de um cabo de aço,

conectado à extremidade superior da ferramenta por meio de um olhal, que permite seu deslocamento vertical controlado no interior do poço. Este cabo passa por uma chave ótica de fim de curso e depois por uma roldana fixada no topo do tripé. Por fim, o cabo é tracionado por um motor elétrico - especificado no capítulo 3.4.3.1 - instalado na base de sustentação da bancada, conforme ilustrado na Figura 31.

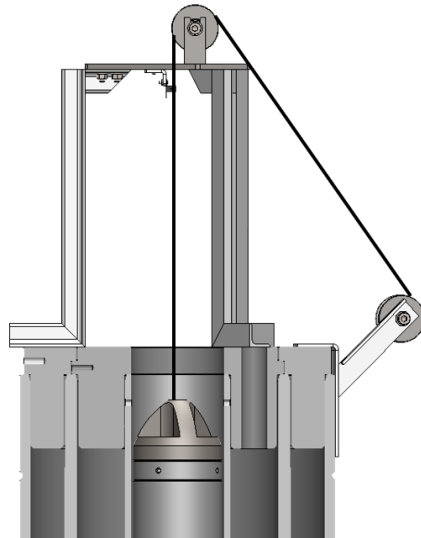


Figura 29: Sistema Tripé de sustentação do 2º protótipo. Plug inferior 7".

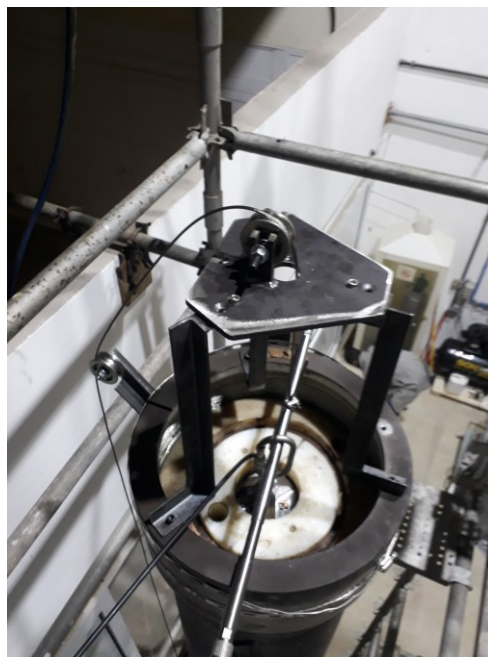


Figura 30: Sistema Tripé de sustentação do 2º protótipo. Plug inferior 7".

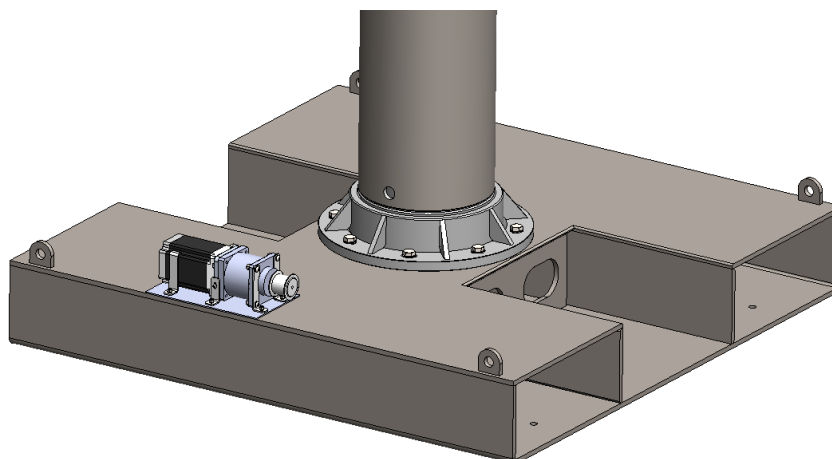


Figura 31: Motor de movimentação do 2° protótipo.

Devido a problemas mecânicos de fragilidade na impressão 3D das polias, o suporte das roldanas foi refeito para o gerenciamento tanto dos cabos dos hidrophones durante o deslocamento vertical dos cabos dos receptores, quanto para alinhamento do cabo de aço com o motor, conforme Figura 32. Este sistema guia os cabos de forma organizada, prevenindo emaranhamentos e garantindo uma movimentação suave e sem obstruções do conjunto dentro da bancada.

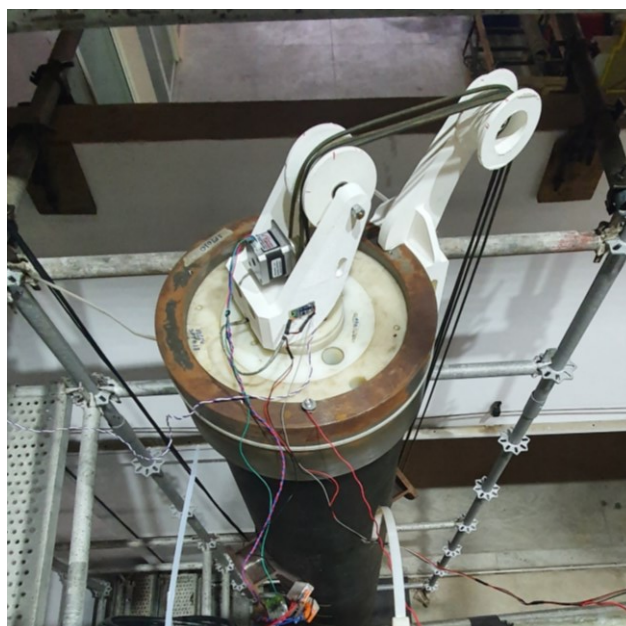


Figura 32: Conjunto de Polias 1° protótipo.

Conforme ilustrado na Figura 33, a extremidade superior da configuração de teste é composta por um cap superior, o qual é rosqueado ao *outer casing*.

Adicionalmente, esta extremidade superior inclui dois munhões de içamento soldados ao *outer casing*. Estes foram dimensionados para garantir operações de içamento seguras de todo o conjunto de tubos, facilitando seu manuseio e posicionamento no local apropriado nas instalações laboratoriais.

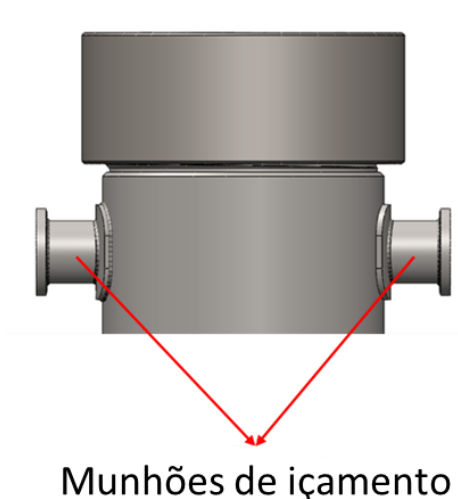


Figura 33: Munhão de içamento soldado no topo da bancada.

3.3

Montagem do setup

O procedimento de montagem detalhado inicia-se com a preparação e inspeção dos componentes. Todos os itens devem ser previamente analisados para verificar a existência de danos ou não conformidades. Quando aplicável, realiza-se a limpeza das peças com panos ou estopa. Para as vedações elastoméricas (o-rings), é crucial aplicar graxa específica em suas cavas correspondentes antes do posicionamento. Qualquer defeito encontrado nos equipamentos implica a paralisação imediata do processo de montagem. A lista de equipamentos auxiliares, como guincho hidráulico, chaves de corrente, cavaletes, graxas, ponte rolante (mínimo 2 toneladas) e tubo centralizador, é fundamental para auxiliar na montagem e desmontagem, prevenindo falhas. Os componentes principais da bancada de teste, estão detalhados na Tabela 11 e ilustrados na Figura 34.

Tabela 11: Lista dos componentes necessários para montagem do conjunto.

Item	Part number	Componente
1	ONPJTLTT-SPT016	Cap Inferior
2	ONPJTLTT-SPT021 / ONPJTLTT-SPT022	Plug Inferior 7" – 9 5/8"
3	ONPJTLTT-SPT015	Outer Casing 13 3/8"
4	ONPJTLTT-SPT001 - ONPJTLTT-SPT005	Casing 7" – 9 5/8"
5	ONPJTLTT-SPT006	Munhão de Içamento
6	ONPJTLTT-SPT010	Cap Superior
7	ONPJTLTT-SPT018 / ONPJTLTT-SPT019	Plug Superior – Casing 7" – 9 5/8"
8	ONPJTLTT-SPT003/ ONPJTLTT-SPT009/ ONPJTLTT-SPT012/ ONPJTLTT-SPT014 / ONPJTLTT-SPT023 / ONPJTLTT-SPT024	Plug Superior – Coluna 7" – 9 5/8"
9	ONPJTLTT-SPT002	Tubing 4 1/2"
10	278 - NBR 70 Shore A	O-Rings Outer Casing - Plugs
11	-	Conector NPT 1/2"
12	-	Olhal M8

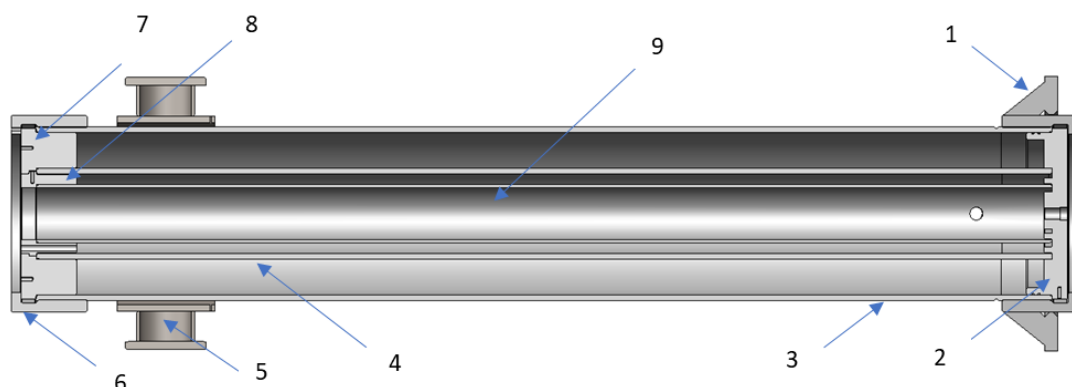


Figura 34: Detalhamento dos componentes do Setup.

A montagem do conjunto interno de tubos começa com o posicionamento do *Casing* (7" ou 9 5/8") sobre cavaletes. O *plug* inferior é preparado com seus o-rings, conectores NPT e olhais, após inspeção e limpeza das cavas e aplicação de graxa o *plug* é então inserido na extremidade do *tubing* de 4 1/2", e o conjunto *tubing/plug* inferior é inserido dentro do *casing*, conforme Figura 35. O alinhamento e avanço dos tubos são feitos ajustando os cavaletes. Para completar esta etapa, a ponte rolante, fixada no olhal do *plug* inferior, levanta o sistema, permitindo a retirada dos cavaletes.



Figura 35: Conjunto *Plug - Tubing - Casing*.

Na extremidade oposta, um tubo centralizador é inserido *tubing* e apoiado em cavaletes para alinhar o sistema. Com o conjunto alinhado, o plug superior *casing-tubing* é inserido, passando pelo tubo centralizador até encostar no tubing como apresentado na Figura 36.



Figura 36: Centralização do *tubing* e inserção do plug superior intermediário.

Em seguida, o conjunto *tubing/casing* já montado é posicionado dentro do *outer casing* de 13 3/8", que também está apoiado em cavaletes. O deslocamento é feito de forma similar, lentamente, até que o tubo centralizador atravessasse todo o *outer casing* e se apoie em um cavalete na outra extremidade. O conjunto é suspenso pelo olhal do plug inferior, o cavalete de apoio é retirado, e o *outer casing* é alinhado até encostar no plug inferior. posteriormente, o plug superior externo (*outer casing – casing*) é inserido, centralizando o sistema.

Para finalizar a montagem do conjunto de tubos, o olhal de içamento é removido do plug inferior, e os caps inferior e superior são rosqueados no *outer casing* até encostarem em seus respectivos plugs, completando assim a montagem do sistema. A etapa subsequente é a montagem do conjunto de tubos na base de sustentação. Com o auxílio da ponte rolante do laboratório, o conjunto de tubos é içado, através de cintas apoiadas nos munhões localizados na parte superior do conjunto de tubos, conforme Figura 37. Simultaneamente, a parte inferior do *setup* era sustentada pelo guincho hidráulico, fixado ao cap inferior por meio de uma cinta. À medida que o sistema era elevado pela ponte rolante, o guincho é gradualmente abaixado. Este método coordenado permitia uma elevação contínua e estável, crucial para evitar o movimento de pêndulo do longo e pesado do conjunto de tubos, garantindo a segurança da operação e a integridade do equipamento. Ele é então cuidadosamente posicionado sobre a base, atentando-se ao alinhamento entre os furos do flange no cap inferior e os furos da base. Após o alinhamento, oito parafusos M16 são inseridos de baixo para cima e fixados com suas respectivas porcas e arruelas, resultando no *setup* completamente montado.

A movimentação para ajuste da excentricidade do *tubing* é realizada mediante o içamento cuidadoso do *tubing* utilizando a ponte rolante, permitindo seu deslocamento lateral e posterior assentamento na posição requerida dentro do *casing*, conforme as configurações de teste planejadas.



Figura 37: Içamento da bancada de teste.

3.4

Protótipos funcionais de ferramentas de perfilagem *through tubing*

Considerando o objetivo de desenvolver uma ferramenta de perfilagem *through-tubing* capaz de operar na bancada de testes experimental, o projeto do protótipo concentrou-se em incorporar as características básicas e essenciais para a efetiva aquisição de dados acústicos em ambiente laboratorial. Embora os requisitos gerais para uma ferramenta de campo sejam extensos, conforme apresentado na Tabela 2, o protótipo aqui proposto foi concebido com um escopo simplificado. Seu propósito é a obtenção de dados acústicos em ambiente controlado, permitindo a análise de parâmetros fundamentais e a validação de conceitos na bancada.

Na fase inicial de concepção do projeto, foram preliminarmente identificados os principais sistemas e subconjuntos de montagem que integrariam o protótipo da ferramenta. Realizado esse levantamento, tornou-se possível estabelecer um estudo sobre a confiabilidade do dispositivo. No âmbito da engenharia de confiabilidade, técnicas como FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) e FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) [61] são amplamente difundidas. Tais técnicas caracterizam-se como métodos quantitativos indutivos (*bottom-up*), que

classificam os modos e efeitos de falhas críticas baseando-se na probabilidade de ocorrência de cada componente individual.

Contudo, no estágio de maturação inicial do projeto, onde o conceito ainda se encontra em fase de validação experimental, a especificação definitiva dos componentes comerciais a serem adquiridos para a versão final da ferramenta ainda não está concluída. Essa característica inviabiliza a aplicação plena de métodos *bottom-up*, que exigem dados precisos de taxa de falha de componentes específicos. Neste contexto, a Análise de Árvore de Falhas (FTA, do inglês *Fault Tree Analysis*) [62] apresenta-se como a metodologia mais adequada e eficaz.

Segundo Lee *et al.* [63], a FTA é uma técnica dedutiva (*top-down*) que analisa o sistema como um todo, considerando as interações entre os diversos subsistemas. Diferentemente do FMEA, a FTA parte de um evento indesejado principal (o "evento topo") e deduz suas causas imediatas e raízes através de uma lógica booleana, permitindo a identificação de falhas mesmo quando a lista final de componentes ainda é estimativa. Ambas as técnicas permitem a avaliação de riscos e a detecção de causas raízes, porém a FTA é capaz de ser executada em fases conceituais onde a visão sistêmica prevalece sobre o detalhe do componente.

A Figura 38 abaixo apresenta a FTA desenvolvida para o conceito do protótipo funcional da ferramenta de perfilagem TT:

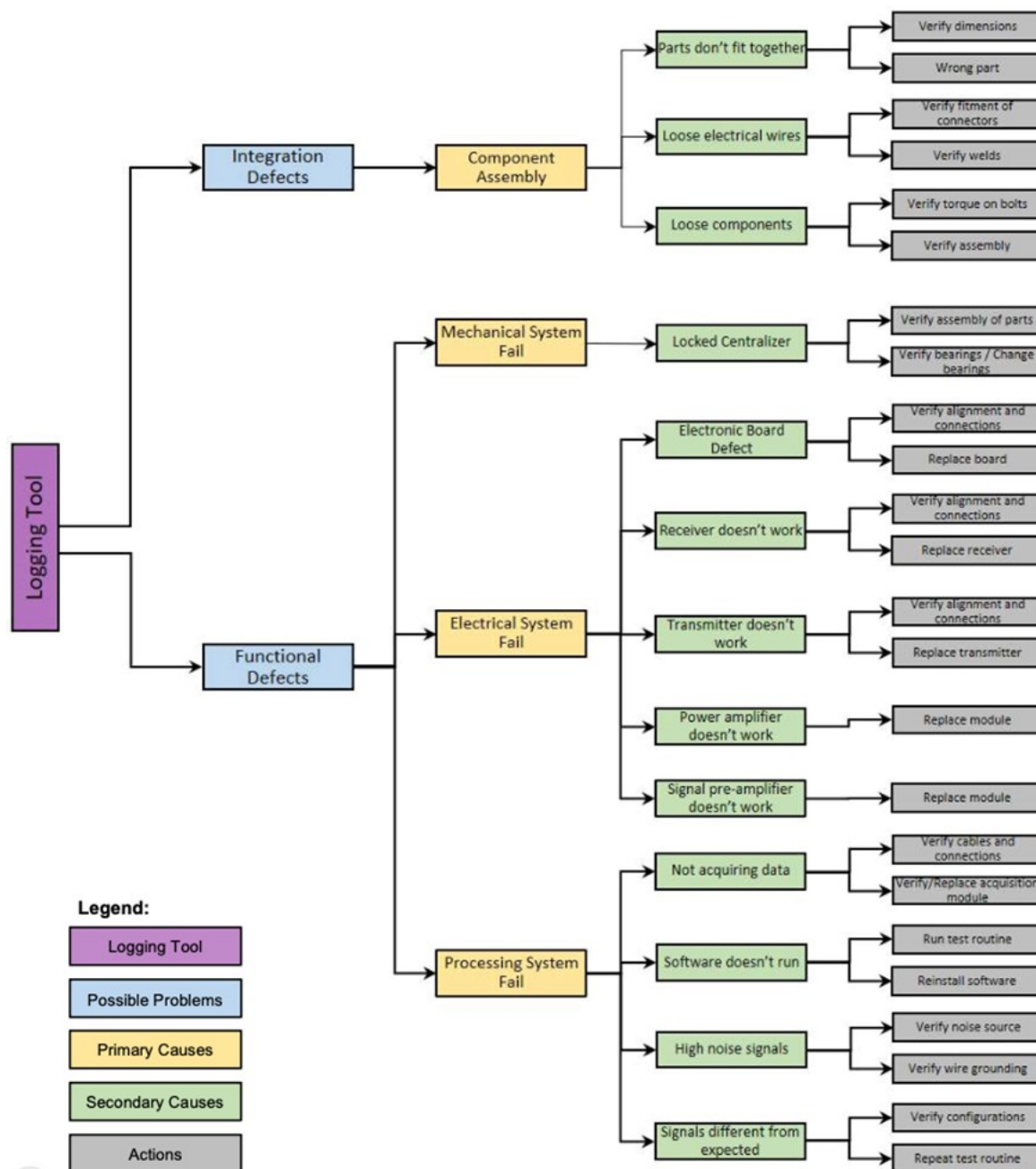


Figura 38: Análise de árvore de falhas da ferramenta *through tubing*.

Esta análise foi estruturada por meio da discretização dos sistemas que compõem a ferramenta, permitindo uma visualização hierárquica dos potenciais sequências de falhas e suas interdependências, sendo dividida em duas categorias:

1. Defeitos de integração: Relacionados à montagem física dos componentes. As causas raízes identificadas nesta ramificação incluem o não acoplamento de parte e sistemas, fios elétricos soltos ou componentes mal fixados. Para estes, foram propostas ações de mitigação como verificação dimensional, inspeção de soldas e conferência de torque em parafusos.

2. Defeitos funcionais: Relacionados à operação dos subsistemas ativos da ferramenta. Esta ramificação subdivide-se em três domínios:

- Falha do sistema mecânico: Abrange o travamento de centralizadores, exigindo verificação de rolamentos e montagem.
- Falha do sistema elétrico: Engloba falhas em placas eletrônicas, transmissores, receptores e amplificadores de potência. As ações corretivas envolvem a verificação de conexões, alinhamento e substituição modular.
- Falha do sistema de processamento: Inclui falhas na aquisição de dados, crashes de software e alta incidência de ruído. As contramedidas incluem a verificação de aterramento, reinstalação de rotinas de software e validação das configurações de teste.

3.4.1

Sistemas do protótipo de ferramenta

Visando a realização dos testes de perfilagem e a garantia de confiabilidade e repetibilidade nos experimentos, foi desenvolvido um sistema de controle de posicionamento da ferramenta e um sistema de excitação e leitura, conforme ilustrado na Figura 39:

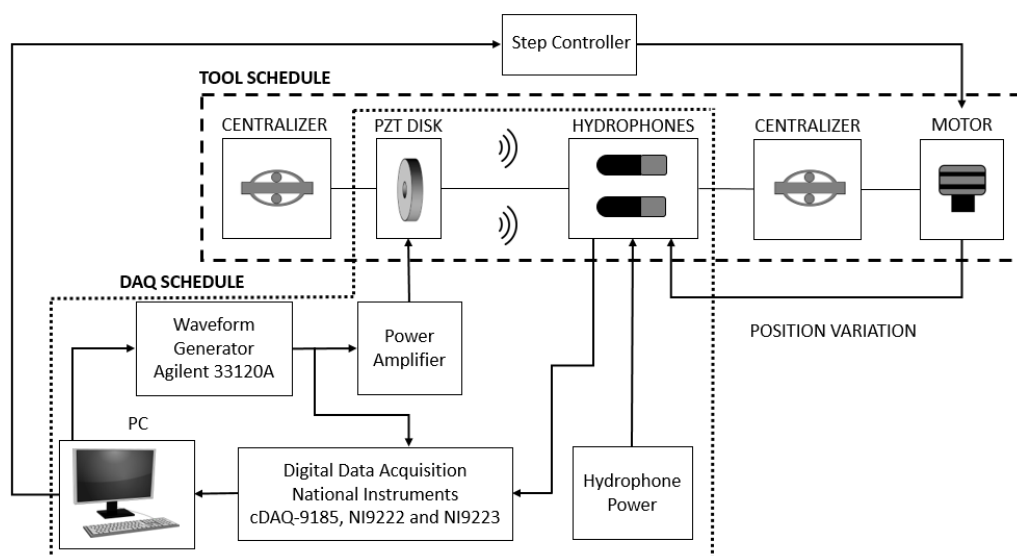


Figura 39: Ilustração do sistema de excitação e leitura da bancada experimental [57].

3.4.1.1

Sistema de controle de posicionamento da ferramenta

Este subsistema permite que as medições de perfilagem sejam realizadas de forma precisa e controlada ao longo do eixo do poço simulado, minimizando erros induzidos por desalinhamento. Os componentes principais do sistema são:

- **Motor de Passo:** É o componente principal para o controle do movimento linear da ferramenta. É ligado ao suporte dos hidrofones e, através de avanços incrementais, permite que os receptores sejam movidos para posições específicas. O movimento é gerenciado por um computador através do *software LabView®* 2018, conforme Figura 41. O motor de passo é especificado no capítulo 3.4.2.
- **Centralizadores:** Dois centralizadores mantêm o alinhamento da ferramenta de medição dentro do revestimento ou *tubing*. Os centralizadores minimizam o movimento lateral ou a oscilação da ferramenta durante os testes, o que poderia introduzir erros nas medições.

3.4.1.2

Sistema de excitação e leitura:

O Sistema de excitação e leitura desenvolvido por Souza [19] é responsável pela geração e aquisição das ondas acústicas após interagirem nas interfaces da bancada de teste, conforme representado na Figura 40. Os principais componentes deste sistema são:

- **Transdutor piezoelétrico (fonte):** Uma cerâmica piezoelétrica modelo APC 850 em formato de disco é utilizada como emissor. Suas especificações dimensionais são: diâmetro externo de 25,0 mm, diâmetro interno de 12,4 mm e espessura de 2 mm. Sua posição é fixa na ferramenta [19];
- **Hidrofones:** Quatro receptores modelo BII-7005FG da Benthowave Instrument Inc. capturam as ondas mecânicas após interagirem com as camadas do poço, convertendo-as em sinais elétricos [19];
- **Gerador de forma de onda:** O dispositivo Agilent 33120A sintetiza o sinal elétrico de excitação. O sinal utilizado foi a função $(\text{sinc}(x) = (\frac{\sin(x)}{x}))$ [19];

- Amplificador de potência: O amplificador Krohn Hite 7500 eleva o sinal de excitação com uma amplificação de 10 vezes antes de ser enviado à fonte, garantindo que as ondas mecânicas sejam geradas com a energia especificada [19];
- Módulo de aquisição de dados (DAQ): O sistema National Instruments (cDAQ NI 9185 com módulos NI 9222 e NI 9223) controla a emissão da fonte e adquire os sinais elétricos dos hidrofones, realizando a conversão analógico-digital. A conversão para o formato digital é necessária para que os dados possam ser armazenados e processados [19];
- Computador: O computador centraliza o controle de todo o sistema (DAQ, Gerador e Motor de Passo) [19].

Os sistemas trabalham juntos e realizam os testes através de um código de computador criado com o *software LabView®* 2018. O código permite controlar e visualizar a forma de onda que excita a fonte, salvar os sinais obtidos pelos hidrofones e alterar a posição dos hidrofones em relação à fonte. O software permite o usuário definir as posições e o número de pontos obtidos por evento automatizando os testes. A função definida por Souza foi o $\left(\frac{\sin(x)}{x}\right)$ de 50 kHz, conhecido como *sinc* (x), esta determinação foi motivada devido ao seu espectro de frequência desejado, uma vez que pretendia-se excitar todas as frequências até 50 kHz, sendo este o valor máximo de frequência comercial padrão da indústria de *O&G*. Já 38 kHz foi a frequência natural do transdutor estabelecido por Souza [19]. A taxa de repetição de 20 Hz foi escolhida para realizar-se uma média de três sinais aquisitados e minimizar ruídos [19]. A Figura 41 ilustra a interface do software com algumas das opções de escolhas de parâmetros e visualização.

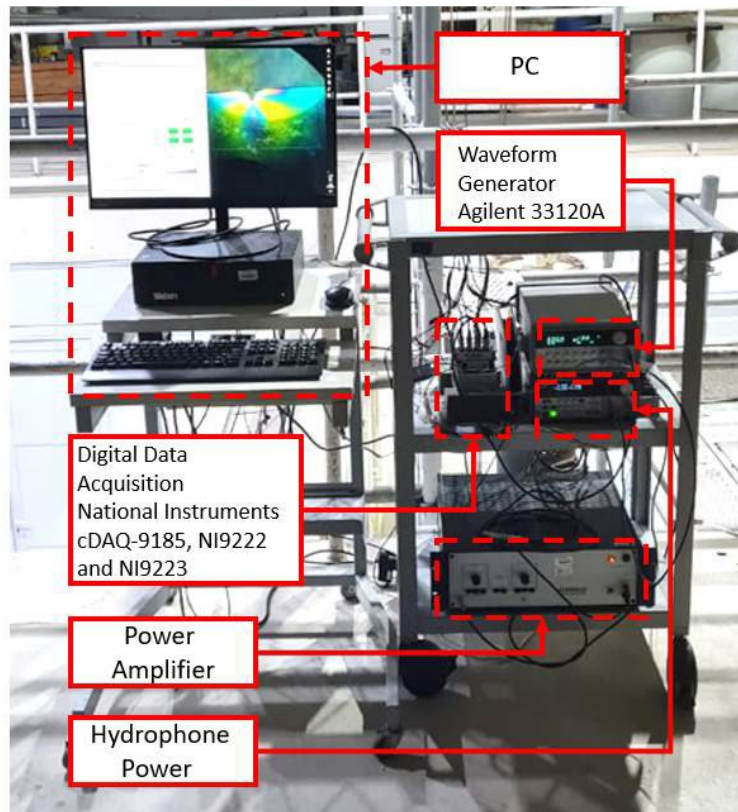


Figura 40: Sistema de excitação e aquisição de dados [19].

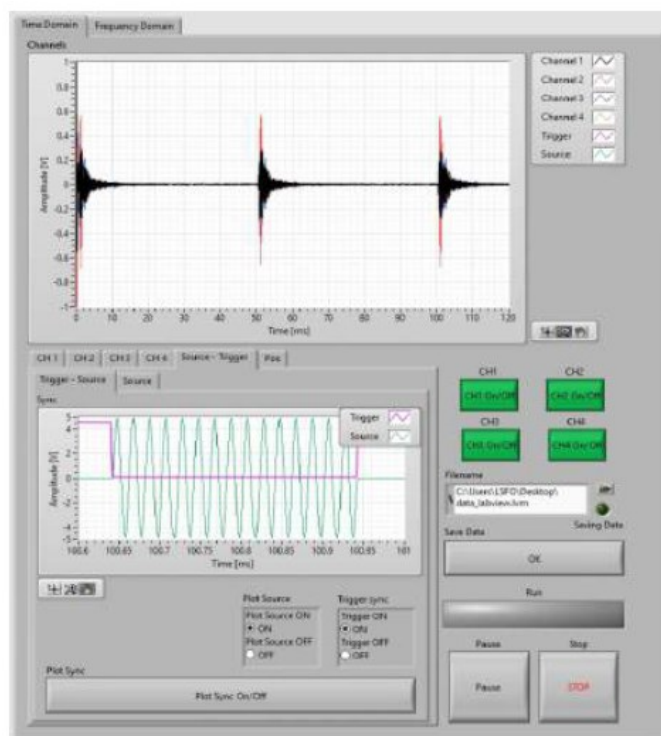


Figura 41: Interface do software [19].

3.4.2

Protótipo 1

A Figura 42 ilustra a arquitetura do primeiro protótipo da ferramenta, sendo concebida em três seções principais:

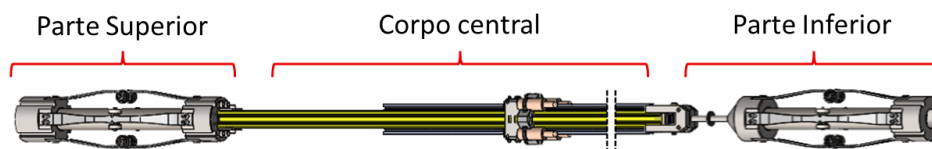


Figura 42: Vista esquemática do primeiro protótipo de ferramenta.

Parte superior: Esta seção aloja o centralizador superior; um flange para fixação da ferramenta, seja do *tubing*, seja no *casing*; o sistema de translação dos hidrofones – composto por um motor de passo, polia e correia dentada – e a saída dos cabos da eletrônica responsável pelo controle da ferramenta e aquisição de dados, conforme apresentado na Figura 43.



Figura 43: Parte superior da ferramenta.

Corpo central: O elemento estrutural principal é uma haste de alumínio de perfil quadrado, que garante a sustentação de todo o conjunto. Ao longo desta haste, estão montados trilhos sobre as quais guias lineares, que alojam o suporte dos hidrofones se deslocam, como apresentado na Figura 44.

O transdutor piezoelétrico está fixado na extremidade inferior desta haste. A fixação da haste ao centralizador superior, ocorre por meio de parafusos, já quanto ao centralizador inferior, a interface é realizada através de uma barra roscada.

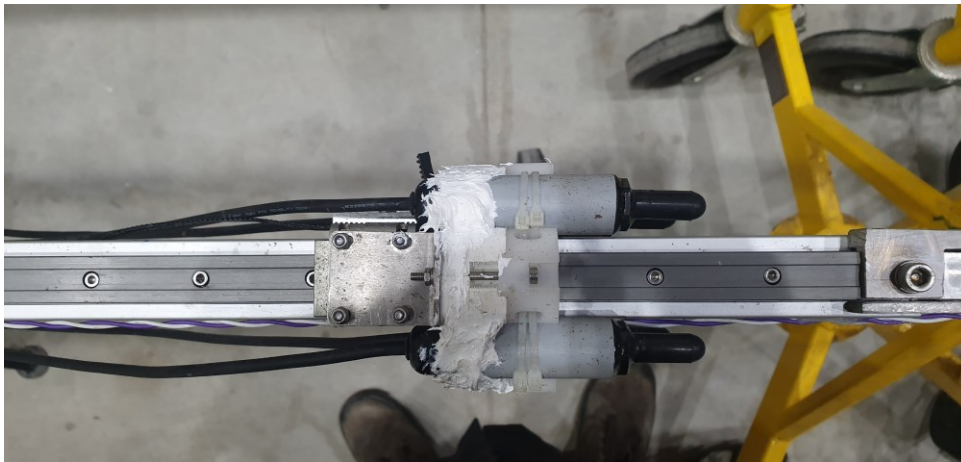


Figura 44: Arranjo dos hidrofones.

Parte inferior: Contém o emissor, a uma distância fixa da região superior e o centralizador inferior, que garante a concentricidade entre a ferramenta e o *tubing*, como ilustrado na Figura 45.



Figura 45: Parte inferior da ferramenta.

A haste central, fabricada com um perfil quadrado de alumínio, serve como base da ferramenta. Ao longo de seu corpo, estão instaladas as guias lineares que permitem o movimento axial do suporte dos hidrofones, ilustrado na Figura 46. Um detalhe construtivo importante é que a presença destes trilhos permite que o suporte dos hidrofones seja deslocado ao longo de um curso definido, possibilitando a varredura de diferentes posições relativas entre emissor e receptores. Esta capacidade de ajuste é fundamental para encontrar as posições ótimas entre a fonte

emissora o receptor e para levantar curvas de caracterização da própria ferramenta e do meio investigado. O suporte móvel acomoda quatro hidrofones idênticos, dispostos radialmente e espaçados angularmente em 90° entre si.

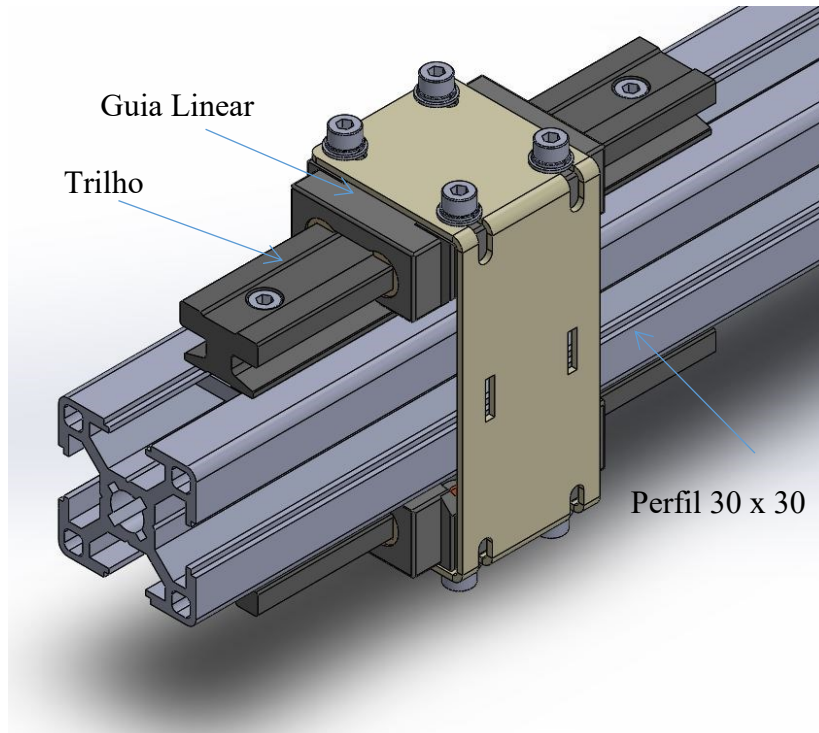


Figura 46 - Montagem do sistema de movimentação dos hidrofones.

A Figura 47 ilustra a integração da parte superior e central da ferramenta:

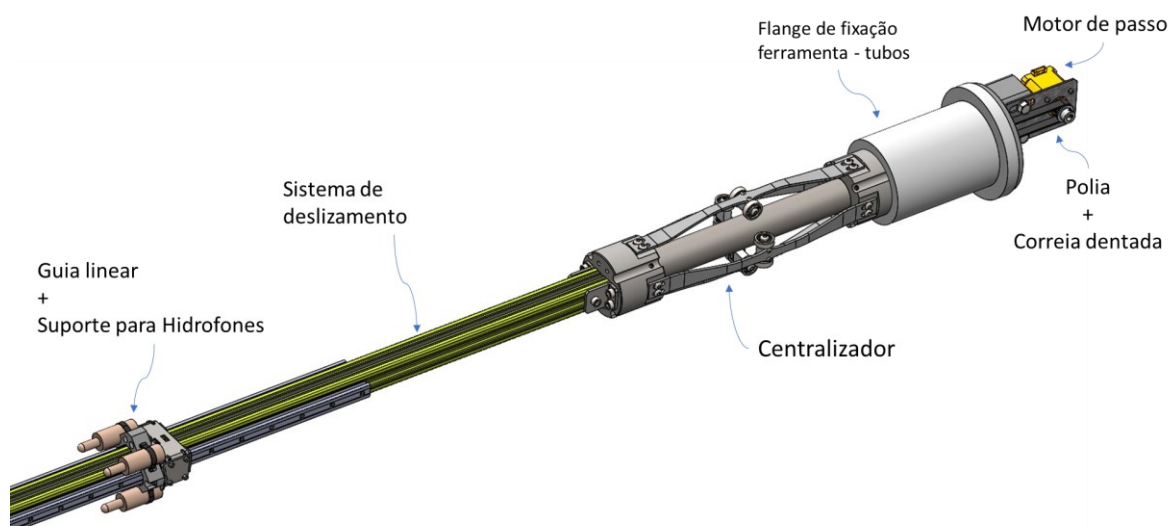


Figura 47: Integração parte superior e central da ferramenta.

As especificações do protótipo são listadas na Tabela 12.

Tabela 12: Especificações do primeiro protótipo de ferramenta.

Temperatura Operacional	Ambiente
Pressão Operacional	Ambiente
Tensão Operacional – Drive Motor	24V DC
Corrente Operacional – Drive Motor	1,75A por fase
Comprimento Máximo	3605,5 mm
Diâmetro Máximo	130 mm
Distância Máxima Percorrida pelo Hidrofone	2020 mm
Peso	22,747 kg
Sensores	Hidrofones e PZT
Materiais	AISI 304, Nylon 6/10 e Al série 6000
Eletrônica	Externa à ferramenta

3.4.2.1

Determinação dos parâmetros geométricos da transmissão

Para a transmissão de movimento, selecionou-se o perfil de correia síncrona GT2 com passo de 2mm e perfil 30x30 (*Gates PowerGrip® GT®2*), conforme Figura 48, reconhecido por sua alta precisão de posicionamento e folga reduzida (*backlash*).

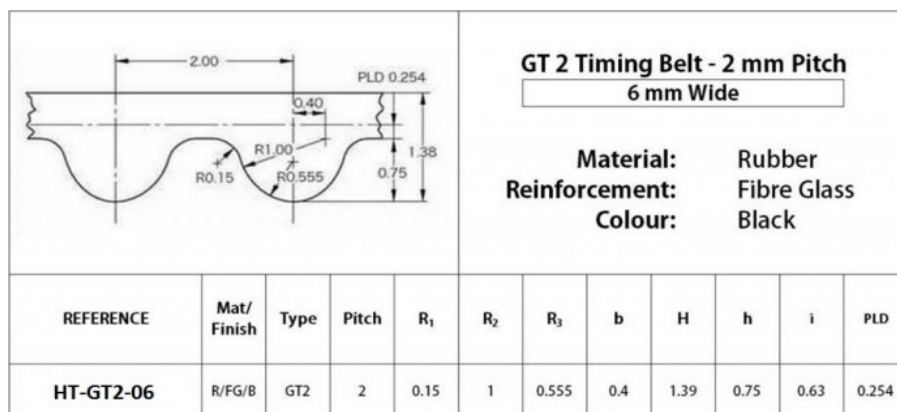


Figura 48: Correia do 1º protótipo [64].

O diâmetro primitivo (D_p) da polia motriz foi determinado em função do passo da correia (P) e do número de dentes (N_d). Adotando-se uma polia com $N_d = 30$ dentes e passo $P = 2$ mm, tem-se:

$$D_p = \frac{N_d \cdot P}{\pi}$$

Substituindo os valores:

$$D_p = \frac{30 \cdot 2}{\pi} = \frac{60}{3,1416} \approx 19,10 \text{ mm}$$

O diâmetro externo (D_e), relevante para a verificação de interferências geométricas, é dado por:

$$D_e = D_p - 2 \cdot \delta$$

Para perfil GT2, o diferencial de altura δ é pequeno ($\approx -0,63 \text{ mm}$), então:

$$D_e \approx 19,10 + 1,26 \approx 20,36 \text{ mm}$$

3.4.2.1.1

Cálculo do Torque Requerido

O torque motor (T_m) necessário deve superar o torque de carga (T_L) imposto pelas resistências do sistema e garantir a aceleração da massa móvel. O modelo dinâmico simplificado para o levantamento vertical de carga considera a força peso e o atrito nas guias lineares.

A força axial total (F_{axial}) a ser vencida é descrita pela equação da dinâmica de translação, conforme Figura 49:

$$F_{axial} = F_g + F_a = m \cdot g + m \cdot a$$

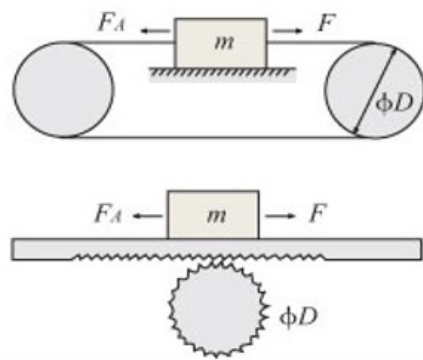


Figura 49: Dimensionamento do torque do motor [65].

Entretanto, para o dimensionamento conservador em regime de velocidade constante ou baixas acelerações (típicas de perfilagem), prioriza-se o componente gravitacional e o atrito. O torque de carga (T_L) é calculado pela relação:

$$T_L = \frac{F \cdot D_{polia}}{2 \cdot \eta \cdot i}$$

Onde:

- F : Força resistente total (N). Assumiu-se a massa total do conjunto móvel (guia linear + suporte + hidrofones) como $m = 3,0 \text{ kg}$, resultando em $F \approx 30 \text{ N}$ (atrito desprezível na vertical);
- D_{polia} : Diâmetro primitivo da polia ($0,0191 \text{ m}$);
- η : Eficiência da transmissão mecânica ($\eta = 0,85$ ou 85%);
- i : Relação de redução (adotado $i = 1$, acoplamento direto).

$$T_L = \frac{30 \cdot 0,0191}{2 \cdot 0,85 \cdot 1} \approx 0,337 \text{ N.m}$$

Para garantir a operação sem perda de passos (*loss of steps*), aplicou-se um fator de serviço (FS) de 1,5 sobre o torque calculado, definindo o torque de pico (T_{pico}) necessário:

$$T_{pico} = T_L \cdot FS = 0,337 \cdot 1,5 \approx 0,506 \text{ N.m}$$

Sendo assim, foi selecionado o motor Nema 17 42HS40, possui torque de retenção (*holding torque*) nominal compatível com a demanda calculada ($\approx 0,5 \text{ N.m}$), validando a escolha para a aplicação.

3.4.2.1.2

Verificação da Capacidade da Correia

A integridade estrutural da transmissão foi verificada comparando-se o torque atuante com a capacidade de transmissão de torque da correia ($T_{correia}$), conforme especificações do fabricante para correias de largura $b = 6 \text{ mm}$, ilustrado na Figura 50. Utilizando fatores de correção para largura ($W_m = 1,0$) e comprimento ($L_f = 1,3$), e considerando o torque base tabelado para a rotação de operação ($T_r \approx 0,27 \text{ N.m}$ para baixas rotações), tem-se:

$$T_{adm} = T_r \cdot W_m \cdot L_f$$

$$T_{adm} = 0,27 \cdot 1,0 \cdot 1,3 = 0,351 \text{ N.m}$$

Table 43 (Cont.) Rated Torque (N-m) for Small Pulleys — 6 mm Belt Width

The following table represents the torque ratings for each belt, in its base width, at the predetermined number of grooves, pitch diameters and rpm's. These ratings must be multiplied by the appropriate width factor and applicable belt length factor to obtain the corrected torque rating (see **Step 7 of SECTION 24**, on page T-150).

the predetermined number of grooves, pitch diameters and rpm's. These ratings must be multiplied by the appropriate width factor and applicable belt length factor to obtain the corrected torque rating (see Step 7 of SECTION 24 , on page T-150).																Belt Width (mm)		4		6		9		12	
																Width Multiplier		0.67		1.00		1.50		2.00	
Number of Grooves		12	14	16	18	20	24	28	32	36	40	48	56	64	72	80									
Pitch Diameter	mm inches	7.64 0.301	8.91 0.351	10.19 0.401	11.46 0.451	12.73 0.501	15.28 0.602	17.83 0.702	20.37 0.802	22.92 0.902	25.46 1.003	30.56 1.203	35.65 1.404	40.74 1.604	45.84 1.805	50.93 2.005									
	10	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.23	0.27	0.31	0.35	0.39	0.47	0.55	0.63	0.71	0.79									
	20	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.22	0.26	0.30	0.34	0.38	0.46	0.54	0.62	0.69	0.77									
	40	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.22	0.26	0.30	0.33	0.37	0.45	0.53	0.61	0.68	0.76									
	60	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.21	0.25	0.29	0.33	0.37	0.45	0.52	0.60	0.68	0.75									
	100	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.21	0.25	0.29	0.33	0.36	0.44	0.52	0.59	0.67	0.74									

Figura 50: Torque para a polia [64].

Nota-se que o torque admissível da correia (0,351 $N \cdot m$) é superior ao torque de carga nominal (0,337 $N \cdot m$), assegurando que a correia operará dentro de seus limites elásticos durante o regime permanente.

3.4.2.1.3

Resolução e Controle de Posicionamento

A precisão espacial da ferramenta depende da resolução linear (R_{linear}) do sistema, que relaciona o passo angular do motor com o avanço linear da correia.

Para um motor de passo padrão com ângulo de passo $\alpha = 1,8^\circ$ (200 passos/volta):

$$R_{\text{linear}} = \frac{\pi \cdot D_p \cdot \alpha}{360^\circ} = \frac{P \cdot N_d}{\text{Steps}_{\text{rev}}}$$

$$R_{\text{linear}} = \frac{2 \cdot 30}{200} = 0,3 \text{ mm/passos}$$

Esta resolução de 0,3 mm é adequada para a discretização das medições acústicas ao longo do poço. A velocidade de deslocamento linear (v) e o tempo total de varredura (t) para um curso $L = 2000 \text{ mm}$, operando a uma rotação conservadora de $\omega = 30 \text{ RPM}$, são dados por:

$$v = \frac{\omega \cdot P \cdot N_d}{60} = \frac{30 \cdot 2 \cdot 30}{60} = 30 \text{ mm/s}$$

$$t = \frac{L}{v} = \frac{2000}{30} \approx 66,7 \text{ s} \approx 1,11 \text{ min}$$

O posicionamento do motor no topo da ferramenta é mostrado na Figura 51.



Figura 51: Posicionamento do motor no topo da ferramenta.

A montagem do primeiro protótipo de ferramenta é um processo lento e minucioso, causado pela grande quantidade de componentes e submontagens, como representado na Figura 52. Devido ao movimento axial realizado pelo arranjo de hidrofones, uma montagem refinada deve ser realizada em todo o sistema de translação. O processo de montagem é estruturado em etapas, iniciando-se pela preparação das seguintes submontagens principais.



Figura 52: Primeiro protótipo de ferramenta.

3.4.3

Protótipo 2

Diante dos desafios operacionais e das limitações identificadas no primeiro protótipo, como a complexidade de montagem, a necessidade de ajustes finos (como o constante ajuste na orientação dos hidrofones), a fragilidade da eletrônica externa, a presença excessiva de cabos soltos e a susceptibilidade a ruídos, tornou-se evidente a necessidade de um novo design para a ferramenta de perfilagem *through-tubing*.

O novo protótipo foi reprojeto para aprimorar a resistência mecânica e a modularidade da integração eletrônica, superando deficiências anteriores e otimizando o processo de aquisição de dados. As principais modificações incluem a substituição do perfil quadrado de haste aberta por um conjunto de módulos tubulares e a fixação precisa da posição dos hidrofones. Essa abordagem proporciona maior robustez mecânica ao sistema e simplifica a montagem e a manutenção, já que os módulos são conectados por juntas rosqueadas, permitindo fácil acesso e substituição de componentes. O novo conceito de ferramenta é apresentado na Figura 53.

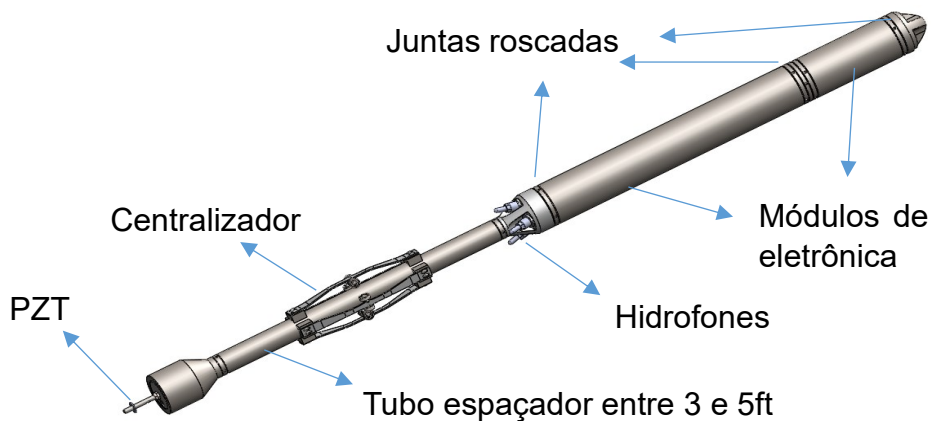


Figura 53: Esquemático do novo protótipo de ferramenta.

3.4.3.1

Características

Diferentemente do protótipo anterior, esta nova ferramenta possui um arranjo fixo de quatro hidrofones alojados em um módulo receptor dedicado e posicionados de forma circular, equidistantes entre si, conforme Figura 54. A distância entre o emissor e os receptores, embora fixa para uma determinada configuração de

montagem, pode ser facilmente variada através da alteração do tubo espaçador. Inicialmente, foram projetados módulos para permitir separações padrão de 3 (CBL) a 5 pés (VDL), alinhando-se com as ferramentas comerciais.

A eletrônica responsável pela aquisição e digitalização do sinal foi reprojeta, conforme ilustrado na Figura 55, não sendo escopo deste trabalho. Essa nova versão é composta por placas retangulares dispostas de forma empilhada e está totalmente embarcada na ferramenta, tendo um módulo dedicado, que é integrado aos demais por juntas rosqueáveis. Este módulo dedicado utiliza de um sistema de *o-rings* para garantir estanqueidade e proteger os componentes. Para a transmissão de dados ao sistema de superfície, optou-se pela utilização de fibra ótica, o que contribui para a integridade do sinal e mitiga os ruídos apresentados na versão anterior. Na parte superior da ferramenta, foram inseridos três conectores distintos, destinados à alimentação da eletrônica embarcada, à transmissão de dados via fibra ótica e à energização do transdutor (fonte).

A movimentação da nova ferramenta ao longo da bancada de testes também foi reformulada. Em vez de utilizar um sistema interno para deslocar os hidrofones, agora a ferramenta inteira é movimentada como um único conjunto. Este deslocamento é realizado por um sistema externo composto por um motor de passo Nema 42, modelo 110HS165, acoplado a um redutor com relação de 4:1. Um conjunto de três polias faz a ligação entre este motor e o protótipo da ferramenta, utilizando cabo metálico preso a um olhal localizado no módulo superior da ferramenta, sendo responsável por seu deslocamento vertical ao longo do setup, simulando assim a operação de perfilagem em campo, conforme Figura 30. Para o controle e segurança do deslocamento, um dispositivo responsável pelo fim de curso e pelo referenciamento da posição da ferramenta é fixado na parte superior do setup, próximo à primeira polia do sistema de tração. Este módulo superior também serve como ponto de ancoragem e conexão para os cabos de excitação do transdutor piezoelétrico e de transmissão de dados, que se conectam às respectivas placas eletrônicas embarcadas.

As principais funcionalidades embarcadas na placa de aquisição incluem:

- Controle da temporização da amostragem dos sinais.
- Disparo simultâneo dos conversores Analógico-Digitais (ADCs) associados a cada canal de entrada dos hidrofones.

- Armazenamento temporário dos dados digitalizados em um *buffer* de memória, com monitoramento contínuo do espaço utilizado.
- Suspensão da fase de amostragem e codificação dos dados para transmissão

As especificações do novo protótipo são apresentadas na Tabela 13

Tabela 13: Especificações do protótipo aperfeiçoado.

Temperatura Operacional	Ambiente
Pressão Operacional	Ambiente
Tensão Operacional – Drive Motor	90V DC
Corrente Operacional – Drive Motor	6A
Comprimento Máximo	1883,5 mm
Diâmetro Máximo	110 mm
Distância Máxima Percorrida	2020 mm
Peso	32,42 kg
Sensores	Hidrofones e PZT
Materiais	AISI 1045, Al série 6000
Eletrônica	Embarcada

Sendo assim, foi obtido um perfil da ferramenta mais robusto em relação a ferramenta conceitual, tornando o sistema mecanicamente mais resistente, e de fácil montagem e manutenção.

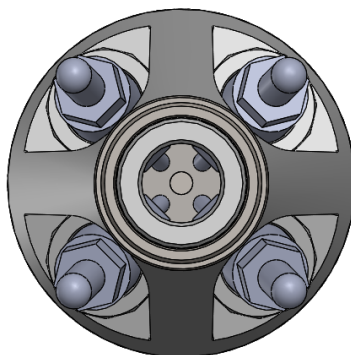


Figura 54: Arranjo fixo de hidrofones.



Figura 55: Eletrônica embarcada do novo protótipo.

4

Resultados

O presente capítulo dedica-se à apresentação e discussão dos dados experimentais obtidos através da bancada de testes desenvolvida, bem como os resultados dos protótipos de ferramenta e os processos de cimentação e dos testes realizados.

4.1

Cimentação

Esta seção descreve o processo de preparação e caracterização das amostras cimentadas na bancada experimental, etapa fundamental para a criação de cenários de avaliação. São apresentados os resultados da cura do cimento nas diferentes configurações de teste.

4.1.1

Processo de vazamento do cimento e desafios

Com o objetivo de reproduzir em laboratório as condições de cimentação encontradas em poços reais, incluindo a inserção controlada de defeitos, foi estabelecido um processo para a fabricação das seções de teste.

Inicialmente, para modelar a estrutura do poço e permitir a criação dos defeitos, foram utilizadas formas cilíndricas de papelão, conforme ilustrado na Figura 56. Conforme apresentado no capítulo 2.5 o tipo de cimento utilizado no primeiro tubo foi o “Supergraute”.

Para os testes de cimentação que envolveram o *casing* de 9 5/8”, foram utilizadas formas de papelão - amplamente utilizado em moldes na construção civil - permitindo conformidade geométrica e fácil remoção pós cura do cimento, apresentando 3000 mm de comprimento e 300 mm de diâmetro.

O processo de cimentação das amostras foi padronizado: utilizando uma ponte rolante, o *casing* era içado por meio de cabos fixados em furos existentes na sua extremidade, e então, inserido concentricamente o molde de papelão na sua extremidade inferior, conforme demonstrado na Figura 57.



Figura 56: Moldes de papelão.



Figura 57: *Casing* 9 5/8" cimentado na vertical.

Dois anéis de madeira, previamente usinados, eram posicionados nas extremidades inferior e superior da amostra, a aproximadamente 500 mm de cada extremidade do tubo, como mostrado na Figura 58 (a). Estes anéis desempenhavam a dupla função de garantir a concentricidade entre o *casing* e o molde, e de impedir o vazamento da pasta de cimento durante o preenchimento. A preparação da mistura de cimento foi realizada no *pilotis* do laboratório, seguindo-se a proporção de água indicada pelo fornecedor e logo em seguida vazado para o tubo, conforme Figura 58 (b).

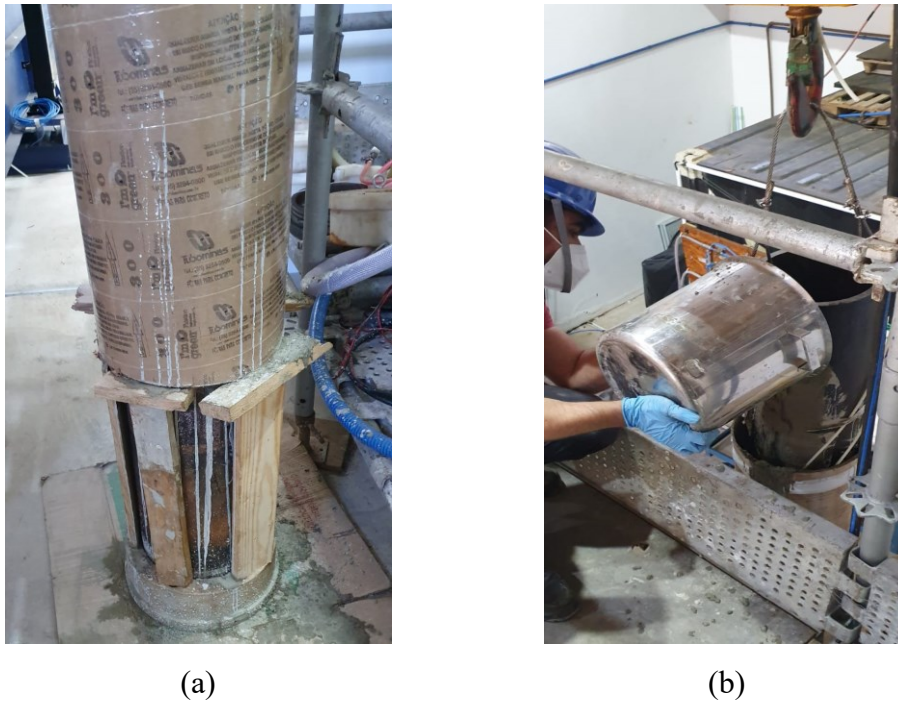


Figura 58: (a) Centralização e sustentação do papelão e (b) Vazamento do cimento

Devido à dificuldade encontrada no vazamento do cimento no primeiro tubo (provavelmente devido à viscosidade da mistura com Supergraute), para os dois tubos subsequentes, que utilizaram Sikagrout 250, adicionou-se 0,5 litro de água a mais por saco de cimento, visando melhorar a fluidez. Outra otimização no processo foi a homogeneização da mistura: enquanto no primeiro tubo a mistura foi realizada manualmente, o que dificultou a obtenção de uma pasta uniforme, para os outros dois tubos foram empregados misturadores mecânicos. O vazamento do cimento nas formas foi sempre realizado com os tubos posicionados verticalmente, utilizando-se um andaime instalado ao redor da bancada de testes para facilitar o acesso à parte superior e garantir o preenchimento completo e adequado do anular. Após a cura, a espessura da camada de cimento resultante foi medida, apresentando aproximadamente 27 mm, valor este considerado na geometria dos modelos numéricos e experimentais.

4.1.2

Cimentação – Boa Qualidade

O principal objetivo desta primeira cimentação é obter uma seção de referência, idealmente homogênea e sem defeitos, e testar a metodologia de

montagem e preenchimento. Sendo assim, essa é uma configuração C – Cimento de boa qualidade, conforme definido no capítulo 3.2.

Para esta atividade, utilizou-se o molde de papelão como forma para o anular de cimento. O *casing* foi fixado na posição vertical com o auxílio da ponte rolante, garantindo o alinhamento adequado para o vazamento do cimento, conforme Figura 59. Foram empregados espaçadores de madeira nas extremidades do tubo, para assegurar a centralização do *casing* dentro do molde externo, visando obter uma camada de cimento concentricamente distribuída, conforme Figura 60.

Após o processo de cura do cimento neste primeiro tubo, observou-se a presença de uma trinca na parte superior da seção cimentada, conforme Figura 61. A análise preliminar indicou que esta fissura, com um comprimento total de aproximadamente 650 mm, provavelmente ocorreu devido ao excesso de água na mistura do cimento ou a tensões durante a cura. Como medida corretiva imediata para evitar a progressão da trinca e permitir a utilização da seção de teste, foram aplicadas fitas de alta resistência e abraçadeiras metálicas na região afetada, buscando conter a propagação da fissura. A trinca estava apenas na extremidade do tubo, e portanto, não afetara o sinal, uma vez que a fonte e os transdutores se localizavam no centro do tubo.

Após a implementação desta solução e a realização de testes subsequentes com esta seção, verificou-se que não houve propagação adicional da trinca, indicando que a contenção foi eficaz para os propósitos experimentais.

Uma das principais constatações resultantes da cimentação deste primeiro tubo, especialmente considerando as características do cimento Supergraute utilizado conforme discutido anteriormente sobre sua granulometria, foi a decisão de mudar para um cimento com granulometria menor (Sikagrout 250) para as cimentações futuras. Esta alteração visou obter misturas mais homogêneas, facilitar o vazamento e reduzir a probabilidade de defeitos indesejados, como a trinca observada.



(a)

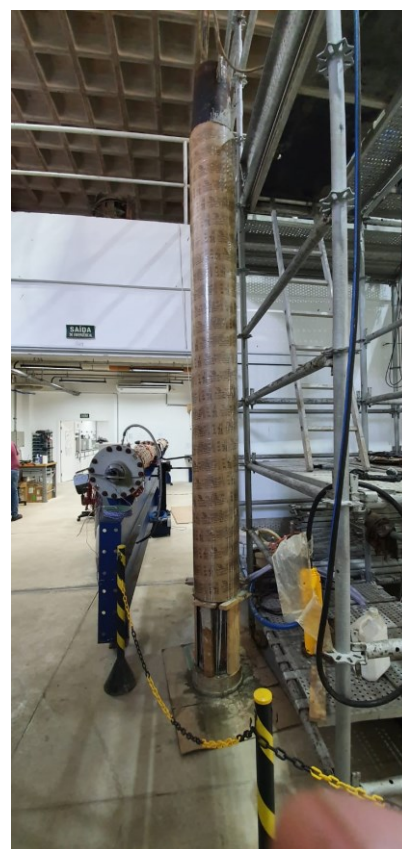


(b)

Figura 59: (a) Início do preenchimento de cimento e (b) Fixação do tubo



(a)



(b)

Figura 60: (a) Suporte da forma de papelão e b) Vista do tubo em processo de cura

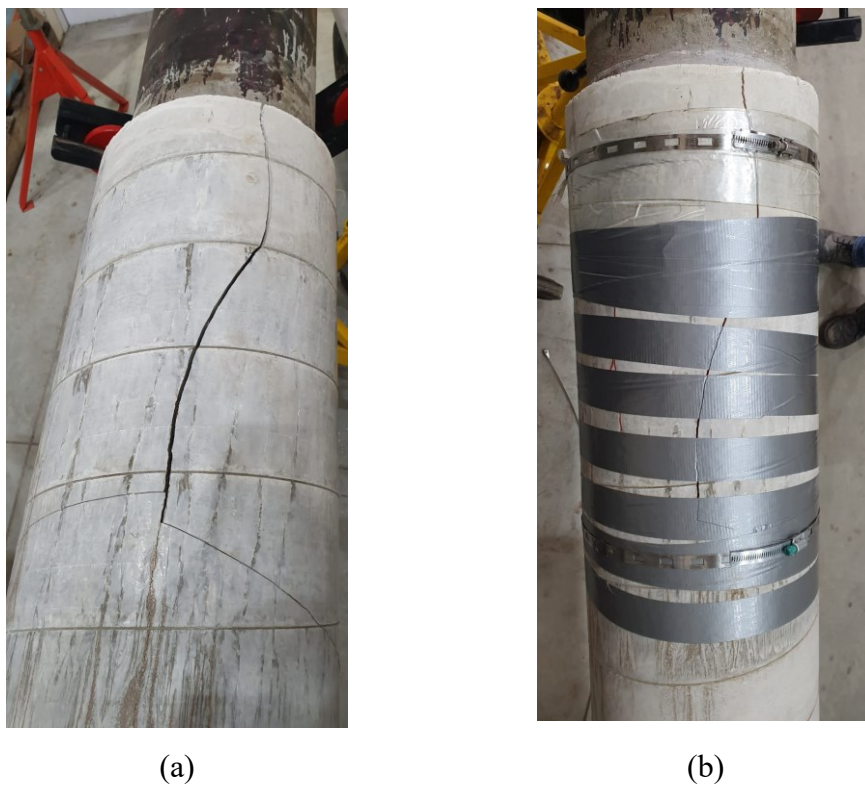


Figura 61: (a) Trinca na parte superior do tubo e (b) Contenção da trinca

4.1.3

Cimentação – Canalização

A cimentação do segundo tubo da bancada experimental incorporou os aprendizados obtidos com o primeiro, visando aprimorar o processo e introduzir defeitos de forma controlada. O objetivo principal nesta etapa foi fabricar uma seção de teste com um defeito de CH - Canalização (do inglês, *channeling*) bem caracterizado.

Para alcançar este objetivo e evitar problemas como a formação de trincas observada anteriormente, dedicou-se maior controle à proporção da mistura de água e cimento, acrescentando 0,5 litros de água por saco de cimento. Além disso, para garantir uma melhor homogeneidade da pasta, foi utilizada uma ferramenta específica para o preparo da mistura, substituindo o método manual inicial.

A simulação do defeito de canalização foi realizada através da inserção de uma mangueira de 6 mm de diâmetro ao longo do anular do molde antes da cimentação, conforme Figura 62.

Os resultados desta segunda cimentação foram satisfatórios:

- Através de observações visuais, foi constatado que neste tubo obteve-se um cimento homogêneo ao longo de toda a sua extensão, indicando a eficácia das melhorias no processo de mistura, conforme Figura 63.
- Não houve presença de trincas na seção cimentada, demonstrando o sucesso no controle da proporção dos materiais.
- O defeito de canalização simulado apresentou-se bem determinado e conforme o planejado, validando a metodologia empregada para sua criação, conforme Figura 64.



(a)



(b)

Figura 62: (a) Fixação do tubo com as mangueiras e (b) Vazamento do cimento



(a)



(b)

Figura 63: (a) Cura do tubo - *Channeling* e (b) Mangueira de 6mm



(a)



(b)

Figura 64: (a) Tubo com cimento homogêneo e (b) Ilustração das três mangueiras

4.1.4

Cimentação – Canalização/Vazio/Microanular

A cimentação do terceiro tubo experimental foi planejada para simular uma condição de baixa qualidade de cimento (CL), incorporando intencionalmente múltiplos tipos de defeitos mimetizar um cenário de cimentação primária deficiente, conforme Figura 65. Contudo, para esta etapa, manteve-se o rigor no controle da razão água-cimento e na utilização de equipamento dedicado para a homogeneização. Tal procedimento visou garantir a consistência da matriz cimentícia base, assegurando que as anomalias observadas fossem decorrentes exclusivamente dos defeitos induzidos e não de variações na qualidade da pasta.

Seguindo as diretrizes de Correia [20], o cenário experimental foi projetado para reproduzir os defeitos listados de maneira simplificada. O objetivo central consistiu em garantir a presença dessas discontinuidades para os testes, limitando-se à sua inserção controlada, sem que fossem realizadas análises comparativas aprofundadas para validar a acurácia física exata entre os componentes aplicados em laboratório e os defeitos reais de poço

Os seguintes métodos foram empregados para criar as imperfeições desejadas:

- Criação de vazios/regiões com diferentes impedâncias: Foi utilizada a inserção de peças de isopor no anular antes da cimentação, com a intenção de que estas formas criassem vazios ou regiões com acentuada variação de impedância acústica dentro da matriz de cimento.
- Simulação de canalização (*Channeling*): Utilizou-se uma mangueira de 10 mm de diâmetro, mais calibrosa que a do teste anterior, disposta longitudinalmente no anular para simular um defeito de canalização de maiores dimensões.
- Criação de microanular (*Microannulus*): Para induzir um microanular, foi aplicada uma fina camada de plástico envolta no *casing* (revestimento) até aproximadamente metade da extensão do tubo antes do vazamento do cimento, conforme Figura 66(a).

Após a cimentação e cura, foram observados os seguintes resultados e desafios:

- Comportamento do isopor: Verificou-se que o isopor não se incorporou adequadamente à matriz de cimento como esperado. Em vez disso, devido à sua baixa densidade, tendeu a flutuar e ficou concentrado predominantemente na parte superior da seção cimentada, não resultando

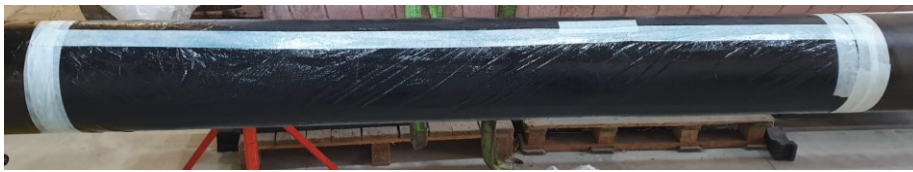
nos vazios distribuídos como inicialmente planejado, não impactando no sinal acústico, conforme Figura 67(b).

- Homogeneidade do cimento: Apesar da questão com o isopor, o cimento no trecho restante do tubo, onde não houve interferência direta dos materiais para simulação de defeitos, apresentou-se homogêneo, conforme Figura 66(b).
- Presença de trinca associada à mangueira: Um resultado adverso significativo foi a presença de uma trinca na região da mangueira de 10 mm. Esta fissura atravessou toda a extensão do tubo ao longo do trajeto da mangueira, indicando que a introdução de um corpo de maior diâmetro para simular o canal pode ter induzido tensões excessivas durante a cura ou criado um plano de fraqueza significativo, conforme Figura 67(a). Assim, este foi assumido como um novo defeito para a investigação dos dados.

Esta etapa forneceu informações valiosas sobre as dificuldades e os resultados da tentativa de criar múltiplos defeitos complexos em uma única seção cimentada em laboratório.



Figura 65: Visualização da mangueira de 10mm e interface para centralização



(a)



(b)

Figura 66: (a) Preparação com plástico para simular microanular e (b) Homogeneidade do cimento



(a)



(b)

Figura 67: (a) Visualização da trinca na direção da mangueira ao longo do tubo e (b) Pedacos de cimento na parte superior do tubo

4.2

Ensaio realizados na bancada de testes

4.2.1

Dificuldades encontradas na montagem

Durante a montagem da bancada experimental, diversas dificuldades e problemas foram encontrados, exigindo atenção e, em alguns casos, adaptações no processo. No que se refere ao cap inferior, identificou-se uma grande quantidade de filetes de rosca, o que, embora possa garantir uma união robusta, tornou o processo de rosqueamento mais demorado. Adicionalmente, a pequena área de contato disponível no cap dificultou a aplicação eficaz da chave de corrente, uma ferramenta essencial para auxiliar no torque necessário durante a montagem. Outro desafio relacionado a este componente foi seu excesso de espessura, que resultou em um peso elevado, dificultando seu manuseio e movimentação durante a instalação. O alinhamento dos tubos internos, como o *casing* dentro do *outer casing*, especialmente após a cimentação, mostrou-se complexo. Essa dificuldade foi atribuída principalmente ao pequeno espaçamento (folga) existente entre a camada de cimento, ou o *casing* a ser cimentado, e o *outer casing*, o que exigiu maior precisão e cuidado para evitar desalinhamentos ou danos na cimentação e nas componentes. Outra questão observada foi relacionada à profundidade das cavas (alojamentos) no plug inferior, destinadas a receber o *tubing* e o *casing*. Verificou-se que estas cavas eram muito rasas. Consequentemente, durante a montagem com os tubos na posição horizontal (antes do içamento para a vertical), havia uma tendência dos tubos (*tubing* e *casing*) de caírem ou se deslocarem do plug, comprometendo a estabilidade e dificultando o encaixe inicial. Por fim, o *tubing* passou a ser içado fora do seu alojamento (“solto” dentro do *casing*), sendo devidamente posicionado em seu respectivo alojamento apenas na posição vertical, já posicionado sobre a base estrutural.

4.2.2

Integração setup de teste – Ferramenta

Após a conclusão da montagem da bancada de testes ou da reconfiguração de um arranjo de defeito, procedia-se à integração do protótipo da ferramenta ao sistema. Devido ao perfil esbelto da ferramenta, esta operação de inserção era realizada manualmente por dois operadores, utilizando um cavalete como apoio

auxiliar para a ferramenta. Com a bancada de testes ainda posicionada sobre seus próprios cavaletes, realizava-se o alinhamento entre o cap superior da bancada e a extremidade correspondente da ferramenta. Subsequentemente, o protótipo era inserido lentamente no interior da bancada, conforme ilustrado na Figura 68.

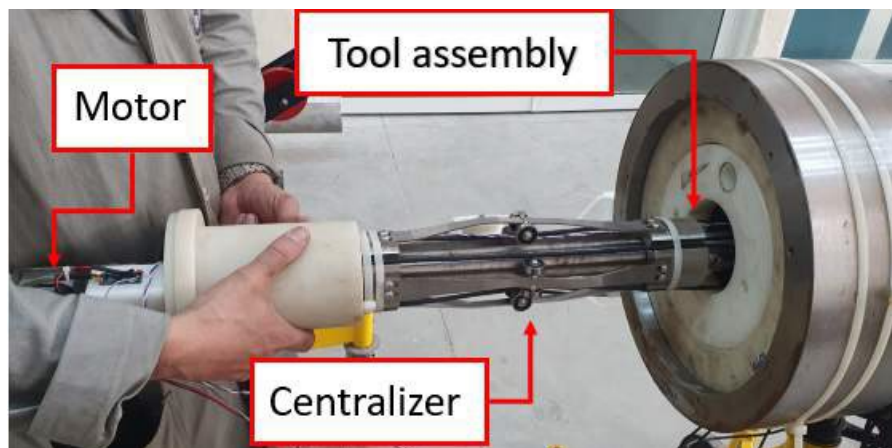


Figura 68: Inserção da ferramenta na bancada de teste

Para os cenários de teste que não incluíam a presença do *tubing*, uma interface confeccionada em nylon em ambas as extremidades da ferramenta: na parte inferior, em conjunto com o centralizador, e na parte superior, próximo ao centralizador superior e à estrutura do motor de passo. Esta interface de nylon desempenhava um papel fundamental, assegurando que a ferramenta permanecesse concêntrica em relação ao *casing*. Tal necessidade surgia porque os centralizadores integrados à própria ferramenta foram projetados para atuar dentro do diâmetro interno do *tubing* e, portanto, não seriam eficazes para centralizar adequadamente a ferramenta na faixa de diâmetros maiores dos *casings*. Devido às restrições de espaço no laboratório, a montagem do conjunto de tubos da bancada de testes era realizada na área externa.

Após a montagem completa do conjunto de tubos, realizava-se o içamento do *setup* para sua posição vertical definitiva dentro do laboratório. Esta operação é a mesma descrita na montagem do *setup*.

Para as operações de ajustes e manutenção na parte superior da bancada de testes, foi necessária a utilização de andaimes, dada a altura considerável do *setup*, conforme ilustrado na Figura 69. A segurança nesta etapa era prioritária, sendo obrigatória a conclusão de um curso de trabalho em altura por todos os operadores envolvidos, bem como a utilização rigorosa dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) correspondentes à atividade.



Figura 69: Vista do andaime.

4.2.3

Especificações de teste

Nesta etapa do projeto, foi delineada as especificações dos testes para validação do conceito da ferramenta de perfilagem *through-tubing*.

O primeiro objetivo alcançado com esta bateria de testes foi a validação do conceito da ferramenta desenvolvida. Esta validação se deu pela comparação entre os resultados obtidos experimentalmente na bancada e aqueles provenientes de simulações numéricas [19]. Inicialmente, os testes foram realizados em configurações simplificadas de tubulação, compostas apenas pelo *casing* e pelo *outer casing*, com o anular preenchido por fluido, ou seja, sem a inclusão do *tubing*. Posteriormente, a coluna de produção foi introduzida na configuração, permitindo a realização de testes específicos de perfilagem *through-tubing*. Os dados obtidos em cada etapa foram comparados com os resultados das simulações numéricas correspondentes realizadas por Souza [19], validando assim o conceito da ferramenta.

Com o conceito validado, a etapa seguinte consistiu-se em escanear as diversas configurações da bancada de teste utilizando a ferramenta. O objetivo principal, neste momento, foi caracterizar detalhadamente e determinar as propriedades de resposta da ferramenta em diferentes cenários. A partir destes dados, foi possível plotar as curvas de dispersão características de cada configuração de teste, através da transformação dos dados acústicos do domínio tempo-espaço para o domínio frequência-vagarosidade. Os resultados obtidos permitiram determinar a melhor configuração física (arranjo e posicionamento de sensores) para a ferramenta. Além disso, essa fase experimental foi fundamental para possibilitar o teste e refinamento de técnicas baseadas em aprendizado de máquina.

Testar a capacidade de identificar defeitos em cenários que mimetizam condições reais é fundamental para o desenvolvimento da ferramenta. Com isso, na configuração de teste, foi feita uma tentativa de reproduzir os defeitos mais comuns encontrados em poços de *O&G*, tais como: diferentes níveis de excentricidade da coluna de produção, defeitos de canalização (*channeling*), variações na qualidade do cimento (bom/ruim), e a simulação de canais de água nas interfaces aço-cimento e cimento-rocha (ou cimento-revestimento externo). Assim como nos testes anteriores, para cada uma dessas novas configurações com defeitos, foram realizadas varreduras completas para adquirir as características de propagação das ondas e as respectivas curvas de dispersão. Nessa etapa, a ferramenta e os parâmetros de aquisição estavam sujeitos a ajustes para otimizar a detecção e caracterização de cada tipo de defeito.

As corridas de perfilagem foram realizadas para um total de dezesseis configurações distintas de *setup*. Estas configurações foram obtidas pela combinação dos quatro níveis possíveis de excentricidade da coluna de produção – NE (concêntrico), E1 (excentricidade média de 48,79%), E2 (excentricidade máxima) e NT (sem *tubing*) – com os quatro diferentes materiais de preenchimento da camada atrás do revestimento: F (Fluido/água), C (cimento de boa qualidade), CH (cimento com defeito de *channeling*) e CL (cimento de baixa qualidade com múltiplos defeitos). Inicialmente as corridas de perfilagem consideraram uma resolução de profundidade de 10 mm, resultando em 200 pontos de aquisição igualmente distribuídos no intervalo de 165,3 mm até 2171,4 mm de distância da

fonte. Essas corridas de perfilagem produziram os sinais no domínio do tempo e da frequência para cada posição do conjunto de hidrofones [57].

Para todos os casos de cimentação (C, CH, CL), foram realizadas 10 corridas com a ferramenta, para cada uma das quatro configurações de excentricidade (NE, E1, E2, NT). A exceção foi o caso com *tubing* concêntrico (NE) para o cimento de boa qualidade (C), onde foram realizadas 20 corridas para aumentar a base de dados utilizada como condição de referência para a técnica de ML. No total, foram executadas 170 corridas com a ferramenta considerando as seções cimentadas.

4.2.4

Preenchimento da bancada com fluido e testes de estanqueidade

Visando proteger os componentes metálicos da bancada de testes contra a corrosão, especialmente devido à presença constante de água durante os ensaios, foi utilizada uma solução anticorrosiva. Optou-se por um produto à base de Monoetilenoglicol, comercializado como PARAFLU®, diluído em água na proporção de 40% de PARAFLU® para 60% de água, de acordo com os estudos de Souza [19].

O projeto inicial da base de sustentação previa que o enchimento e o esvaziamento do conjunto de tubos fossem realizados através de conexões no cap inferior. Contudo, após a instalação destas conexões, verificou-se que o espaço disponível para manusear as válvulas de abertura e fechamento era extremamente limitado, tornando o procedimento de enchimento e drenagem demorado e pouco prático.

Diante dessa dificuldade, a estratégia de enchimento foi modificada. O *setup* passou a ser preenchido com a mistura de água e PARAFLU® através de um furo dedicado, localizado na parte inferior do *outer casing* (revestimento externo). Neste furo, foi instalada uma torneira de plástico, que servia como ponto de entrada para o fluido. O enchimento foi realizado por meio de um sistema de mangueiras conectado a esta torneira. Uma bomba elétrica era utilizada para transferir a mistura anticorrosiva de um galão de armazenamento diretamente para o interior da bancada de testes, conforme ilustrado na Figura 70.



Figura 70: Torneira e mangueira para preenchimento e escoamento de fluido

Para garantir que todas as seções anulares e o interior dos tubos fossem completamente preenchidos e que o fluido pudesse se distribuir uniformemente, foram realizados furos nas extremidades inferiores dos tubos internos (como o *casing* e o *tubing*), conforme ilustrado na Figura 71. Estes furos permitiam a interligação hidráulica entre os diferentes compartimentos da bancada durante o processo de enchimento. Os principais equipamentos utilizados neste procedimento foram, portanto, a bomba de transferência, as mangueiras de conexão, a torneira plástica instalada no *outer casing* e o recipiente para armazenamento da mistura água/PARAFLU®.

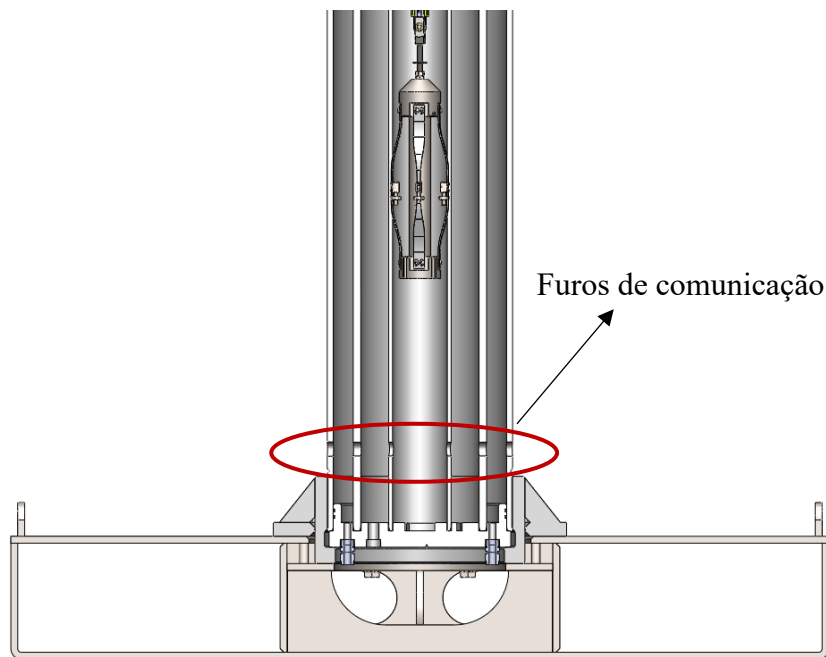


Figura 71: Furos de comunicação nos tubos

Para o esvaziamento do fluido da bancada de testes, o procedimento era relativamente simples: a mesma mangueira utilizada para o enchimento era conectada à torneira na parte inferior do *outer casing*, e sua outra extremidade direcionada ao galão de armazenamento, permitindo que o fluido fosse drenado do sistema e reaproveitado para outros testes.

Após cada enchimento completo do setup com a mistura de água e PARAFLU®, uma etapa crucial de inspeção era realizada. Eram cuidadosamente analisados o plug inferior, com especial atenção aos *o-rings* responsáveis pela vedação, e todas as conexões do cap inferior. Esta verificação minuciosa tinha como objetivo identificar e corrigir quaisquer possíveis vazamentos no sistema. Somente após a constatação da completa estanqueidade de todas as juntas e vedações é que os testes de perfilagem eram iniciados, garantindo a integridade do experimento e a segurança operacional.

4.2.5

Testes preliminares de configuração

Após a montagem completa do primeiro protótipo da ferramenta, foram iniciados os testes preliminares de configuração com o conjunto integrado de hidrofones e emissor. Para estes ensaios, a ferramenta foi posicionada, com o auxílio de um pórtico, no centro de um tanque de testes, com dimensões

aproximadas de 1,5 m de altura, 1,5 m de largura e 1,0 m de comprimento e preenchido com água, conforme Figura 72 e Figura 73. O principal objetivo desta etapa foi obter informações sobre o comportamento dos transdutores quando integrados à estrutura da ferramenta e permitir a realização das primeiras configurações e calibrações do sistema completo. Diversas corridas experimentais foram conduzidas, nas quais se testaram a frequência do sinal da fonte e a taxa de aquisição dos dados acústicos. Os hidrofones foram deslocados para várias posições ao longo do curso útil da ferramenta, variando de 165,3 mm a 2171,4 mm em relação à fonte.

Além da resposta dos transdutores, o sistema de locomoção e o mecanismo de referenciamento da posição dos hidrofones foram avaliados. Durante estes testes, observou-se uma perda de referência de posição quando o suporte dos hidrofones percorria toda a extensão da ferramenta até seu limite inferior (próximo à fonte PZT) e, em seguida, retornava à posição inicial ou a outros pontos. Esse problema indicou uma deficiência no sistema de feedback de posição e na calibração do curso, evidenciando a necessidade de ajustes e recalibração no sistema de referenciamento para assegurar a acurácia e a repetibilidade do posicionamento dos hidrofones, um requisito fundamental para a correta interpretação dos dados de perfilagem. Como correção, foi adotado um sistema de tensionamento da correia dentada, onde era possível ajustar o motor a partir de um anteparo fixado a ferramenta, sendo solucionado o problema.



Figura 72 : Estrutura do teste preliminar



Eletrônica de controle,
posicionamento e potência

Figura 73: Disposição da ferramenta e eletrônica

4.2.6

Testes de validação sem cimento

Os primeiros testes de validação da ferramenta de perfilagem foram conduzidos em uma configuração da bancada sem a presença de cimento, com o objetivo principal de corroborar a proposição inicial do protótipo: obter dados acústicos e avaliar a viabilidade de verificar a qualidade do cimento. Os resultados dos sinais adquiridos experimentalmente na bancada de testes são comparados entre os resultados obtidos nas simulações numéricas.

Os testes exploraram os diferentes arranjos possíveis da configuração da bancada sem o cimento. Com a ferramenta devidamente posicionada, o arranjo que transporta os hidrofones iniciou seu movimento axial ao longo da haste principal. Durante este deslocamento, os sinais acústicos foram continuamente adquiridos em

diversas posições, permitindo mapear e determinar os locais onde as melhores leituras, sinais mais claros e representativos, eram obtidas.

A expectativa era que as posições que apresentassem as melhores leituras experimentais coincidisse com as previsões das simulações numéricas para arranjos equivalentes. Este processo de varredura e aquisição de dados foi repetido quantas vezes foram necessárias para garantir a consistência e a confiabilidade dos resultados. É importante reiterar que, durante todos esses testes, o emissor piezoelétrico permaneceu fixo na extremidade inferior da haste da ferramenta, próximo ao centralizador inferior, servindo como ponto de referência para as medições de distância dos hidrofones.

4.2.6.1

Teste 1: Revestimento 9 5/8" sem *tubing* 4 1/2".

Para o primeiro teste, a configuração utilizada foi apenas com o *outer-casing* 13 3/8" e o revestimento de 9 5/8" montados concentricamente. Após posicionar a ferramenta de perfilagem, o mandril que transporta os hidrofones é movido ao longo da haste, adquirindo os sinais para obter os locais de melhor resposta. A configuração é preenchida com água. Na Figura 74 há uma imagem da seção transversal deste teste.

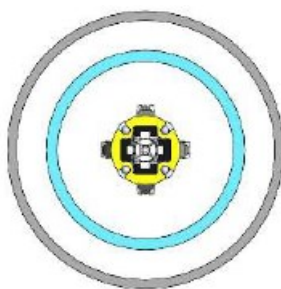


Figura 74: Primeira configuração do teste sem cimento

4.2.6.2

Teste 2: *tubing* concêntrico 4 1/2" - Revestimento 9 5/8".

Para este teste, a configuração do teste 1 foi mantida e um *tubing* de 4 1/2" foi introduzido. Nesta configuração que a perfilagem *through tubing* foi testada.

Novamente, a configuração é preenchida com água. A Figura 75 exibe essa configuração.

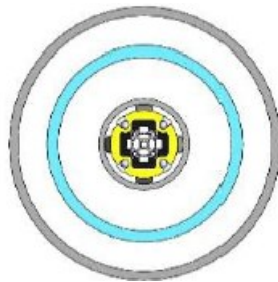


Figura 75: Segunda configuração do teste sem cimento

4.2.6.3

Teste 3: *tubing* excêntrico 4 1/2" - Revestimento 9 5/8".

Para este teste, a configuração do primeiro teste é mantida, porém uma modificação é feita; a coluna de produção, que era inicialmente concêntrica, foi movida para uma posição excêntrica (E1). A Figura 76 mostra a configuração para este caso.

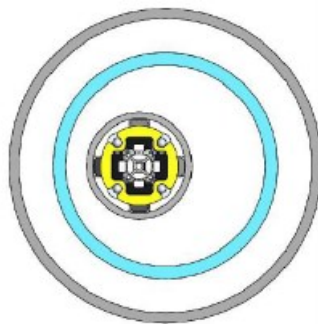


Figura 76: Terceira configuração do teste sem cimento.

4.2.6.4

Teste 4: *tubing* extremamente excêntrico 4 1/2" - Revestimento 9 5/8".

A configuração para este caso corresponde a uma situação extrema, , onde o *tubing* toca a parede interna do revestimento. A Figura 77 mostra a configuração para este teste.

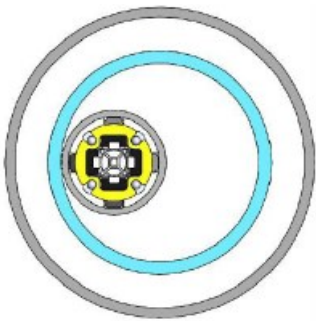


Figura 77: Quarta configuração do teste sem cimento.

Após a finalização dessa bateria de testes, os dados adquiridos são analisados e comparados com os dados obtidos nas simulações numéricas. A próxima etapa é semelhante às anteriores, mas desta vez, em vez do revestimento de 9 5/8", foi usado um de 7". O roteiro para esta segunda bateria de testes começa com a utilização apenas do revestimento e do *outer casing*, depois a coluna de produção é introduzida no teste, configurando assim a perfilagem *through tubing*. Os dados obtidos são processados e analisados, o resultado é comparado novamente com os dados das simulações numéricas. A Figura 78 e a Figura 79 mostram o arranjo dos testes propostos.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Configuration				
Test type	Concentric	Concentric TTL	Eccentric TTL	Eccentric TTL
Pipes	13 3/4" – 9 5/8"	13 3/4" – 9 5/8" – 4 1/2"	13 3/4" – 9 5/8" – 4 1/2"	13 3/4" – 9 5/8" – 4 1/2"

Figura 78: Arranjos de 9 5/8".

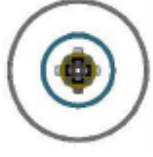
	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
Configuration				
Test type	Concentric	Concentric TTL	Eccentric TTL	Eccentric TTL
Pipes	13 3/4" – 7"	13 3/4" – 7" – 4 1/2"	13 3/4" – 7" – 4 1/2"	13 3/4" – 7" – 4 1/2"

Figura 79: Arranjos de 7".

4.2.7

Testes de validação com cimento

Os testes seguintes possuem um fato adicional na configuração da bancada de testes: cimento é introduzido. A princípio, foi idealizado a presença de cimento na superfície externa do *outer casing*, porém, devido limitação física (incremento de peso) e por ser mais uma variável de análise, optou-se por ser uma configuração futura a ser empregada na bancada de teste.

Para a execução destes testes com cimento, foram utilizados três tubos de casing de 9 5/8” preparados com diferentes condições:

- O primeiro tubo foi cimentado sem a introdução de defeitos intencionais, servindo como referência de boa cimentação e para a caracterização inicial da resposta da ferramenta a uma camada de cimento íntegra.
- No segundo tubo, foram incorporadas mangueiras durante o processo de cimentação para simular o defeito de *channeling*.
- No terceiro tubo, visando simular uma condição de cimento de baixa qualidade e múltiplos defeitos, além da introdução de mangueira para *channeling*, foi inserido um filme de plástico até a metade do tubo, para caracterizar o defeito de *microannulus*, e foram adicionados pedaços de isopor para reproduzir vazios na cimentação.

4.3

Protótipos

A seguir são apresentados as análises realizadas para os protótipos de ferramentas.

4.3.1

Protótipo 1

Embora o primeiro protótipo da ferramenta de perfilagem *through-tubing* tenha sido concebido apenas como uma prova de conceito, ele desempenhou um papel fundamental na fase inicial do projeto. Com sua utilização, foi possível confirmar que as distâncias de 3 e 5 pés, já amplamente empregadas no mercado,

proporcionam os melhores níveis de sinal. Além disso, todos os testes planejados puderam ser executados com sucesso, resultando em um volume significativo de dados experimentais. Estes dados foram fundamentais para validar as simulações numéricas realizadas e para iniciar o desenvolvimento e fortalecimento do algoritmo de aprendizado de máquina.

No entanto, durante sua operação, o primeiro protótipo revelou algumas limitações e problemas operacionais que necessitavam de correção para não comprometer a execução dos testes. Dentre as principais dificuldades, destacaram-se a fragilidade geral do sistema de movimentação e a complexidade no posicionamento preciso dos hidrofones. Também surgiram problemas relacionados à referência precisa da posição dos hidrofones em relação à fonte emissora ao longo do curso de deslocamento. Isso ocorreu, inicialmente, devido ao comportamento dos cabos dos hidrofones: durante o movimento de subida do arranjo os cabos do hidrofone não acompanhavam a mesma velocidade de movimento do suporte e permaneciam no interior do *setup*, devido a restrição de espaço no interior do *tubing*, o que acabava provocando travamentos no sistema dos receptores, fazendo com que o encaixe da correia saltasse da polia. A solução encontrada foi colocar um contrapeso na região dos cabos que se encontravam na parte externa dos tubos, além disso, foi desenvolvido um conjunto de polias, que guiavam os cabos para dentro e fora da bancada de teste sem “arrastar” em outra interface.

Sendo assim, os desafios operacionais incluíram:

- A necessidade de instalação da ferramenta na bancada apenas com esta na posição horizontal, devido restrições de altura do laboratório, o que não reflete as condições reais de operação em poço.
- Um processo de montagem considerado complexo e demorado.
- A exigência de ajustes finos demorados para garantir o alinhamento e o funcionamento adequado do suporte dos hidrofones.
- Dificuldade em mover os hidrofones de forma suave e repetitiva ao longo da haste.
- A presença de muitos fios e cabos soltos na configuração, o que aumentava o risco de danos e interferências.

- A susceptibilidade a ruído elétrico proveniente de diferentes fontes no ambiente laboratorial devido a eletrônica não ser embarcada na ferramenta.

A análise desses pontos críticos evidenciou duas situações principais que demandavam uma alteração conceitual na ferramenta: primeiramente, a quantidade excessiva de cabos elétricos externos e as partes móveis expostas do sistema de translação dos hidrofones; adicionalmente, a ferramenta era longa, de secção reduzida, relativamente sensível a desalinhamentos e frágil nas interfaces com os centralizadores. Além disto, a parte eletrônica responsável pelo deslocamento dos receptores era frágil e fora da ferramenta, ficando assim, exposta ao clima e a possíveis danos. Cabos do emissor e receptor apresentavam-se soltos pelo setup, dificultando a movimentação e montagem do conjunto. Por fim, devido à proximidade dos cabos dos hidrofones e da eletrônica, ruídos eram presentes. Estes não foram quantificados e sensibilizados, mas observou-se que com os afastamentos dos cabos o ruído diminuía.

4.3.2

Protótipo 2

A concepção do segundo protótipo da ferramenta de perfilagem *through-tubing* foi norteada pela necessidade de superar as limitações da primeira versão, visando a transição de um modelo experimental acadêmico para um protótipo com funcionalidades operacionais. A principal evolução estrutural consistiu na adoção de um perfil cilíndrico robusto e modular com juntas roscáveis. Essa configuração não apenas conferiu maior resistência mecânica e confiabilidade ao manuseio em laboratório, mas também simplificou os processos de montagem e manutenção, permitindo o acesso facilitado aos componentes internos e a reconfiguração para diferentes arranjos de teste.

Diferentemente do primeiro protótipo, onde os hidrofones eram móveis ao longo de uma haste central, o novo conceito fixou os sensores em posições predefinidas dentro de um módulo receptor dedicado, garantindo distâncias constantes entre transmissor e receptores. Essa arquitetura permitiu encapsular a eletrônica no corpo da ferramenta e eliminar partes móveis externas, resultando em uma redução significativa do cabeamento. Conforme ilustrado na Figura 32, o

sistema passou a utilizar apenas três cabos (hidrofones, fibra ótica e fonte), além do cabo de aço para movimentação. Tal modificação organizou o arranjo experimental e mitigou riscos de falhas por mau contato ou interferências eletromagnéticas.

Outra alteração fundamental foi a mudança na estratégia de deslocamento: em contraste com o sistema anterior, que movia o suporte dos hidrofones, a nova ferramenta movimenta-se integralmente. Essa abordagem eliminou a complexidade de alinhamento dos receptores, suprimindo uma fonte de dificuldades operacionais.

Todavia, a validação experimental do segundo protótipo foi comprometida por falhas no módulo dos hidrofones. As restrições diametrais impostas pelo *tubing*, somadas à espessura necessária para as juntas rosçadas, reduziram o volume interno disponível. Consequentemente, o posicionamento radial dos quatro hidrofones precisou ser angulado, conforme ilustrado na Figura 54, fazendo com que os sensores exercessem pressão mútua durante a inserção no alojamento, resultando em danos físicos que inviabilizaram os testes acústicos. Adicionalmente, o *plug* de vedação falhou, permitindo o ingresso de água nos compartimentos da eletrônica e dos sensores. Embora a movimentação mecânica da ferramenta na bancada tenha sido validada com êxito, a aquisição de sinais não foi possível, evidenciando a necessidade imperativa de um reprojeto do módulo receptor.

No segundo protótipo, a distância entre a fonte e os hidrofones foi fixada, eliminando o deslocamento relativo interno presente na versão anterior. Essa decisão de projeto foi motivada pela necessidade de aumentar a robustez do sistema e aproximá-lo da arquitetura de ferramentas comerciais, que operam com espaçamentos padronizados de 3 pés (para o registro CBL) e 5 pés (para o registro VDL).

Consequentemente, a aquisição de dados restringe-se a esses afastamentos fixos, o que inviabiliza a construção de curvas de dispersão (número de onda *versus* frequência) com a resolução espacial obtida no Protótipo I. Entretanto, a análise mantém-se válida ao focar na variação dos sinais acústicos (amplitude e tempo de trânsito) registrados a 3 e 5 pés, permitindo a comparação entre seções com e sem falhas na cimentação, bem como a avaliação dos efeitos do cenário *through-tubing*.

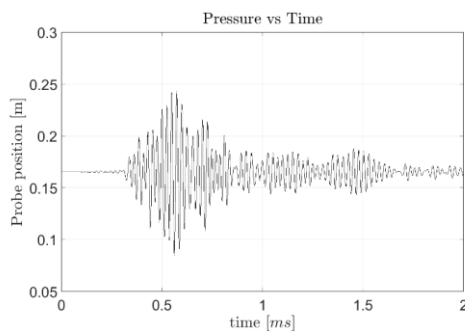
4.4

Dados obtidos – Experimentos

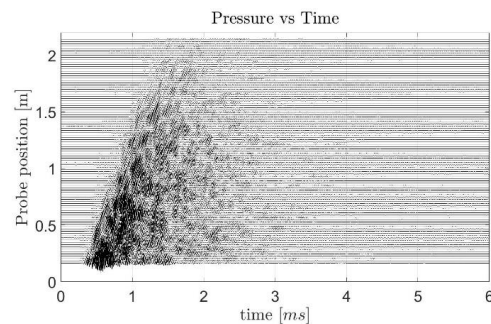
A seguir, são apresentados os resultados experimentais obtidos nos ensaios da bancada de testes. Os sinais acústicos adquiridos pelo protótipo foram processados e analisados tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, servindo de base para a validação do modelo numérico frente aos dados empíricos. A análise comparativa indica relativa concordância entre a simulação e os experimentos, corroborada pelas métricas de Erro Quadrático Médio (MSE, do inglês *Mean Squared Error*) no domínio do tempo. Similarmente, no domínio da frequência, observou-se uma correlação consistente entre as curvas de dispersão. Os resultados são promissores, demonstrando a viabilidade da aquisição de dados de cimentação e indicando que, mediante processamento avançado, o método de perfuração *through-tubing* apresenta potencial efetivo para a identificação de defeitos. Os dados experimentais serviram de base para o trabalho relatado por Souza *et al* [54].

Os registros no domínio do tempo foram realizados ao longo do comprimento útil da ferramenta (distância percorrida pelos hidrofones), totalizando 1830 medições. A alta relação sinal ruído evidenciada no gráfico das figuras (c) permitiu que os sinais fossem interpretados sem a necessidade de tratamentos.

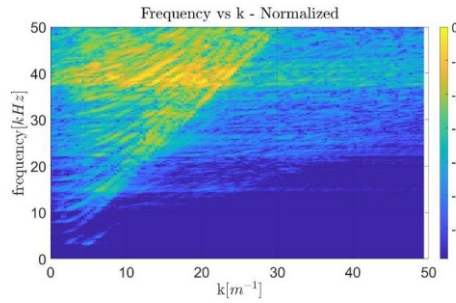
No caso F-NT, observaram-se mudanças significativas dos modos nas faixas de frequência de 10 a 20 kHz e 30 a 40 kHz para o sinal de excitação sinc frequência de 50kHz no transdutor cuja frequência natural era 38kHz, conforme Figura 80.



(a) F-NT, domínio do tempo, primeiro probe.



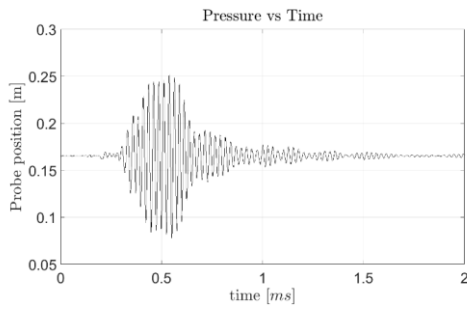
(b) F NT, domínio do tempo, 1830 probes.



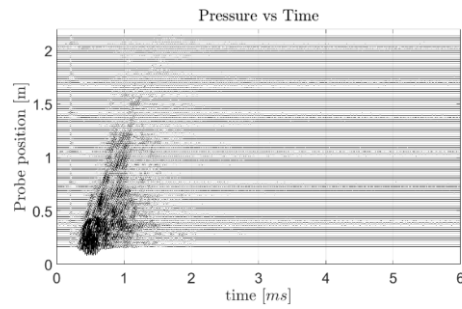
(c) F-NT, domínio da frequência, experimental.

Figura 80: Resultado do tubo sem cimento e sem tubing.

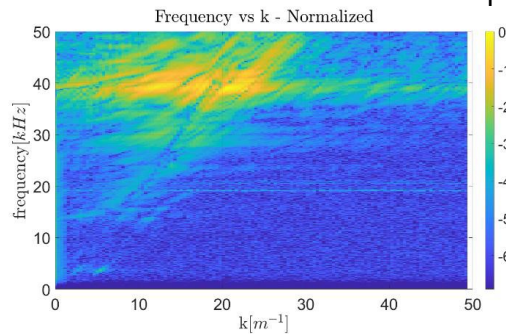
A ausência de *tubing* gera maiores reflexões para este modelo, dissipando o sinal aproximadamente 1,2 m da fonte. Este fato afeta os sinais no domínio do tempo, Figura 81(a), e consequentemente as curvas de dispersão na Figura 81(c).



(a) C-NT, domínio do tempo, primeiro probe.



(b) C-NT, domínio do tempo, 1830 probes.

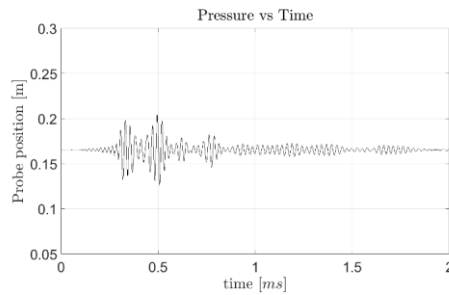


(c) C-NT, domínio da frequência, experimental.

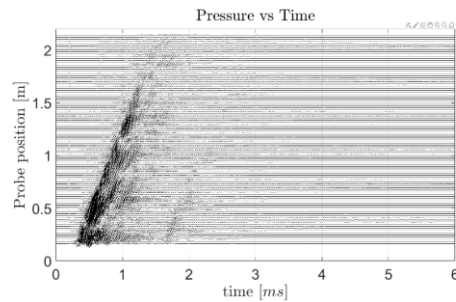
Figura 81: Resultado do tubo com boa cimentação e sem *tubing*.

A Figura 82(a) mostra os sinais no domínio do tempo para o modelo C-E1, neste caso, os sinais no domínio do tempo mostram amplitude mais baixa em torno de 1,6 m e tornam-se muito ruidosos. Isso afeta diretamente as curvas de dispersão no domínio da frequência, Figura 82(c), e a identificação dos modos de onda, que

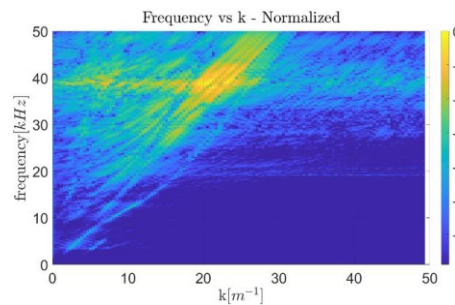
acabam não sendo tão claros. No entanto, os modos de onda ainda são visíveis e a faixa de frequência em torno de 30 kHz.



(a) C-E1, domínio do tempo, primeiro probe.



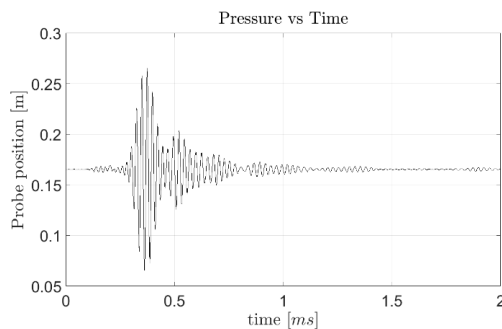
(b) C-E1, domínio do tempo, 1830 probes.



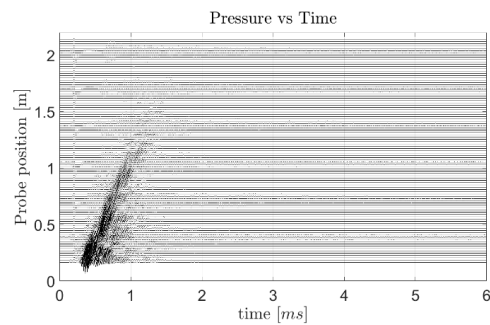
(c) C-E1, domínio da frequência, experimental.

Figura 82: Resultado do tubo com boa cimentação e com excentricidade média do *tubing*

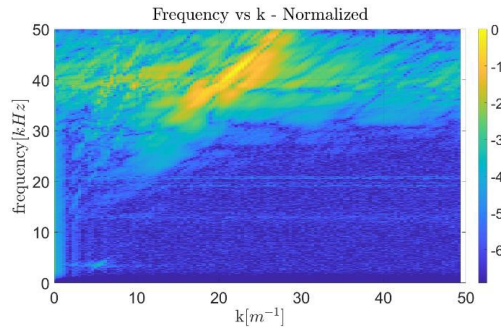
A Figura 83 (a) mostra os sinais no domínio do tempo. Note que, no meio da configuração, em torno de 1,1 m, a onda desaparece completamente. Portanto, o gráfico da curva de dispersão fica comprometido como mostrado na Figura 83(c), cujas formas de onda dificilmente aparecem, apenas algumas delas entre 0 e 10 kHz. Foi utilizado a faixa de frequência de 20 a 30kHz, valores empregados pelas principais ferramentas comerciais.



(a) CH-NE, domínio do tempo, primeiro probe.



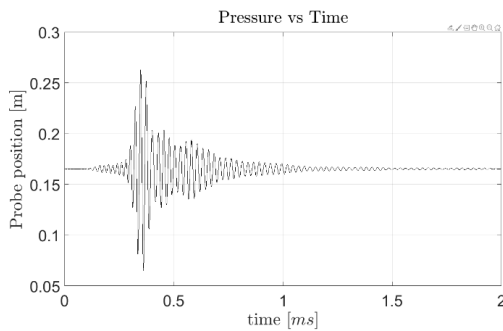
(b) CH-NE, domínio do tempo, 1830 probes.



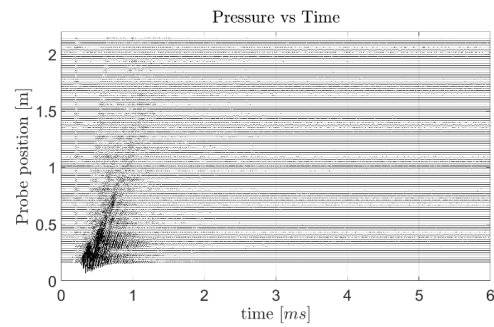
(c) CH-NE, domínio da frequência, experimental.

Figura 83: Resultado do tubo com canalização e com *tubing* concêntrico.

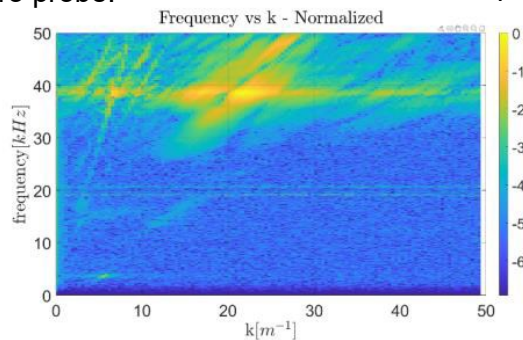
A Figura 84 (a) mostra o sinal no tempo para o modelo CH-E1 ao longo do eixo y. Assim como a curva anterior, para o modelo CH-NE, no meio da configuração, a onda é completamente anulada. Embora, neste caso, a forma de onda seja um pouco mais clara, veja a Figura 84 (c), nota-se os modos de onda entre 0 e 10 kHz.



(a) CH-E1, domínio do tempo, primeiro probe.



(b) CH-E1, domínio do tempo, 1830 probes.



(c) CH-E1, domínio da frequência, experimental.

Figura 84: Resultado do tubo com *channeling* e excentricidade média do *tubing*.

5

Conclusão

A presente dissertação consolidou o desenvolvimento de uma plataforma experimental robusta e de ferramentas de perfilagem acústica dedicadas ao cenário do abandono de poços offshore. A pesquisa demonstrou que a inspeção *through-tubing* é não apenas teoricamente viável, mas passível de verificação experimental controlada, preenchendo uma lacuna entre as simulações numéricas e as operações de campo. A bancada de testes projetada e construída permitiu a reprodução de geometrias complexas *multi-string* (*tubing*, *casing* e *outer casing*), viabilizando a inserção controlada de defeitos de cimentação — como canalizações, microanulares e vazios — e a variação da excentricidade da coluna de produção. A capacidade de simular esses fenômenos em ambiente laboratorial proporcionou a aquisição de sinais acústicos repetíveis, gerando um robusto tamanho de dados, essenciais para a validação de modelos numéricos e para o treinamento de algoritmos de interpretação.

No tocante ao desenvolvimento instrumental, o primeiro protótipo validou o conceito físico de medição e a geometria de aquisição, o segundo protótipo avançou significativamente em termos de integração eletrônica, aproximando-se das características de ferramentas comerciais.

O êxito desta abordagem é sublinhado pela geração de três patentes e pela publicação de artigos científicos, consolidando a contribuição deste trabalho para o avanço do estado da arte. Como resultado direto da pesquisa inovadora conduzida com este equipamento, foram geradas três patentes e publicados dois artigos científicos, sublinhando seu impacto significativo no avanço do conhecimento e na criação de novas soluções tecnológicas. Sendo assim, a ferramenta de perfilagem utilizada cumpriu com sucesso seu papel, adquirindo com precisão os dados acústicos que fundamentaram essas análises e confirmaram as observações.

Como continuação deste trabalho sugere-se:

- Reprojetar o sistema mecânico do módulo receptor do segundo protótipo, com foco na interface de acoplamento dos hidrofones e no sistema de vedação.
- Realizar um estudo de engenharia detalhado para adequar a bancada de testes à operação sob pressão.

- Ampliar a matriz de testes experimentais incorporando novos tipos de cimentos, defeitos e geometrias, visando enriquecer o banco de dados para o treinamento de algoritmos de *machine learning* mais generalistas.
- Aprimorar a eletrônica para permitir o processamento de sinal *in-situ* ou a transmissão de dados em alta velocidade para a superfície, reduzindo o tempo de aquisição e facilitando a operação de perfilagem contínua.
- Investigar métodos para integrar uma camada de material geológico ou sintético (com impedância acústica equivalente à rocha) na bancada de testes.

6

Bibliografia

- [1] PENN STATE UNIVERSITY. Introduction | PNG 301: Introduction to Petroleum and Natural Gas Engineering - Dutton Institute. [S. l.]: The Pennsylvania State University, [202–]. Disponível em: <https://www.e-education.psu.edu/png301/node/699>. Acesso em: 26 março 2025.
- [2] BORGES, Sarah M. S. Recuperação avançada de petróleo (EOR) com a utilização da glicerina bruta (GB) coproduto da produção de biodiesel. 2009. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.
- [3] VRÅLSTAD, T.; SAASEN, A.; FJÆR, E.; ... Plug & abandonment of offshore wells: ensuring long-term well integrity and cost-efficiency. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 173, p. 478-491, 2019.
- [4] MOREIRA, José Roberto Ferreira et al. A solution for monitoring of subsea wells temporarily abandoned. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP, [2024]. Disponível em: <https://biblioteca.ibp.org.br/scripts/bnmapi.exe?router=upload/38345>.
- [5] WANG, H.; TAO, G.; SHANG, X. Understanding acoustic methods for cement bond logging. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Melville, NY, v. 139, n. 5, p. 2407–2416, 2016.
- [6] CORREIA, Tiago de Magalhães et al. Analytical and numerical modeling of through-tubing acoustic logging. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE 2020, 2020, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2020. ISSN 2525-7579.
- [7] QIN, Zhenyu et al. Design of a comprehensive test bench for acoustic logging tool based on FPGA. *Journal of Geophysics and Engineering*, Oxford, v. 22, n. 2, p. 417–427, abr. 2025.
- [8] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Sistema de Gerenciamento da Integridade de Poços (SGIP). [S. l.], [202–]. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/sistema-de-gerenciamento-da-integridade-de-pocos-sgip>
- [9] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Projeto de abandono permanente. [S. l.], [2020]. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/sistema-de-gerenciamento-da-integridade-de-pocos-sgip>

e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/projeto-de-abandono-permanente

- [10] BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução ANP nº 817, de 24 de abril de 2020. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?legislacao=393623>.
- [11] INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS. Diretrizes para abandono de poços. Rio de Janeiro: IBP, 2022. 127 p.: il. color. (Caderno de boas práticas de E&P). E-book em PDF. Disponível em: <www.ibp.org.br/biblioteca>. ISBN 978-65-88039-14-4.
- [12] NORSOK. NORSOK D-010:2021+AC:2024: Well integrity in drilling and well operations. Lysaker, Noruega: Standard Norway, 2024.
- [13] OIL & GAS UK. Well Decommissioning Guidelines. 7. ed. London, UK: The UK Oil and Gas Industry Association Limited, 2022.
- [14] BUREAU OF SAFETY AND ENVIRONMENTAL ENFORCEMENT (BSEE). 30 CFR Part 250, Subpart Q—Decommissioning Activities. In: U.S. Government Publishing Office. [S. l.]: 2023. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/current/title-30/chapter-II/subchapter-B/part-250/subpart-Q>. Acesso em: 08 março 2025.
- [15] BRASIL. Resolução ANP nº 46, de 1º de novembro de 2016. LegisWeb, [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=330646>.
- [16] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Caderno de descomissionamento: aspectos socioeconômicos. [S. l.], [202–]. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/arq/di/caderno_de_descomissionamento-aspectos-socio-economicos-fgv.pdf
- [17] FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS – FGV ENERGIA. Descomissionamento offshore no Brasil. Rio de Janeiro: FGV Energia, [202–]. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_descomissionamento_offshore_final.pdf
- [18] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Painel dinâmico de descomissionamento de instalações de exploração e produção. Portal Gov.br, [s. d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-sobre-exploracao-e-producao-de-petroleo-e->

gas/painel-dinamico-de-descomissionamento-de-instalacoes-de-exploracao-e-producao

- [19] SOUZA, L. P. B. Modelo numérico semi-analítico para a propagação de ondas acústicas guiadas em tubulares excêntricos com aplicações na perfilagem de poços de petróleo. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2024.
- [20] CORREIA, T. M. Analytical solution for the propagation of guided acoustic waves in multilayered cylinders applied to through-tubing cement bond logging in oil wells. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- [21] ZEROUG, S. et al. Sonic and ultrasonic measurement applications for cased oil wells. *Insight – Non-Destructive Testing & Condition Monitoring*, Northampton, v. 58, n. 8, p. 423-430, 2016.
- [22] KINSLER, L. E. et al. *Fundamentals of acoustics*. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. 560 p.
- [23] ROSE, J. L. *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 504 p.
- [24] WANG, Hao et al. Study on annular pressure buildup phenomenon in subsea wells considering the effect of cement. *Energy Science & Engineering*, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 63–75, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ese3.1008>.
- [25] BRAGA, A. M. B.; BARBONE, P. E. ; HERRMANN, G.. Wave propagation in fluid-loaded laminated cylindrical shells. *Applied Mechanics Reviews*, 43(5S):S359–S365, 05 1990.
- [26] BRAGA, A. M. B.; ARONI, C. R.. High-frequency response of isotropic laminated cylindrical shells modeled by a layer-wise theory. *International journal of solids and structures*, 42(14):4278–4294, 2005.
- [27] TALBERG, A. S.; JOHANSEN, T. F.; LARSEN, I. Laboratory experiments on ultrasonic logging through casing for barrier integrity validation. *NTNU Open*, [S. l.], [2017].
- [28] SOUZA, Natalino da Silva et al. Avaliação da qualidade de cimentação por meio da perfilagem acústica CBL/VDL: estudo de caso do poço escola 1-GWL-1-RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS – PDPETRO, 12., 2024. Anais [...].
- [29] ZUO, P.; COWAN, J.; KLIMENTOS, T. Azimuthally acoustic logging tool to evaluate cementing quality. *Journal of Geophysics and Engineering*, v. 11, n. 4, p. 045006, 2014.

- [30] GOWIDA, A.; AL-LOHEDAN, T.; AL-SHAJRAWI, O.; AL-DOSSARY, M. Cement Evaluation Challenges. In: SPE SAUDI ARABIA ANNUAL TECHNICAL SYMPOSIUM AND EXHIBITION, 2018. Anais [...]. OnePetro, 2018.
- [31] ØIA, T. M. et al. Innovative approaches for full subsea P&A create new opportunities and cost benefits. In: SPE NORWAY ONE DAY SEMINAR, 2018. OnePetro.
- [32] VIGGEN, E. M.; JOHANSEN, T. F.; FOLKESTAD, M. A. Through-tubing ultrasonic cement evaluation using leaky Lamb waves: A simulation study. In: SEG TECHNICAL PROGRAM EXPANDED ABSTRACTS 2016. Anais [...]. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 2016. p. 530–534.
- [33] GARDNER, D. J.; PIROVOLOU, D. An experimental facility for evaluating well barrier verification technology. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 2018. Anais [...]. Richardson, TX: SPE, 18 abr. 2018.
- [34] Khalifeh, M., Gardner, D., & Haddad, M. Y., “Technology Trends in Cement Job Evaluation Using Logging Tools,” Paper SPE-188274-MS, 017 Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, 13–16 November, Society of Petroleum Engineers, doi:10.2118/188274-MS, 2017.
- [35] Izuhara, W., Yamamoto, H., Blyth, M., & Saenz, E. “Full-Range Quantitative Cement Bond Evaluation with LWD Sonic: The Right Way of Approach Using a Hybrid of Amplitude and Attenuation”. 2017, October 9, Society of Petroleum Engineers.
- [36] HE, Xiao; CHEN, Hao; WANG, Xiuming. Ultrasonic leaky flexural waves in multilayered media: Cement bond detection for cased wellbores. *Geophysics*, v. 79, n. 2, p. A7–A11, 2014.
- [37] GOVIL, Amit; GARDNER, Dave; OBANDO, Guillermo; BELTRÁN-JIMÉNEZ, Katherine; SKADSEM, Hans Joakim. Validating ultrasonic log response against reference barrier cells simulating downhole well conditions encountered during well construction and abandonment operations. In: IADC/SPE INTERNATIONAL DRILLING CONFERENCE AND EXHIBITION, 2020, Galveston, Texas, EUA. Anais [...]. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2020. Paper SPE-199578-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/199578-MS>.
- [38] KYI, K. K.; WANG, A. G. J. Issues with Cement Bond and Cement Evaluation Logs – Case Studies from Offshore Malaysia. In: INTERNATIONAL PETROLEUM TECHNOLOGY CONFERENCE, 2015, Doha. Anais [...]. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2015. IPTC-18538-MS. DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-18538-MS>.

- [39] ZHANG, J. et al. Multi-string isolation logging – A cost effective solution for P&A. In: SPE BERGEN ONE DAY SEMINAR, 2019, Bergen. OnePetro. SPE-195607-MS.
- [40] VIGGEN, E. M.; JOHANSEN, T. F.; MERCIU, I. Understanding acoustic physics in oil and gas wellbores with the presence of ubiquitous geometric eccentricity. AIP Conference Proceedings, v. 1949, n. 1, p. 020018, 2018.
- [41] LIU, Y.; D'ANGELO, R. M.; CHOI, G.; ZHU, L.; BOSE, S. ; ZEROUG, S.. Understanding acoustic physics in oil and gas wellbores with the presence of ubiquitous geometric eccentricity. AIP Conference Proceedings, 1949(1):020018, 04 2018.
- [42] WANG, H.; FEHLER, M. The wavefield of acoustic logging in a cased hole with a single casing—Part II: a dipole tool. Geophysical Journal International, v. 212, n. 2, p. 1412–1428, fev. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggx475>.
- [43] CHATAR, C.; BLYTH, M. Effective BHA design and vibration modeling for improving the quality of sonic measurements. In: SPE/IADC DRILLING CONFERENCE AND EXHIBITION, 2011, Amsterdam. Anais [...]. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2011. Paper SPE-140326-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/140326-MS>.
- [44] CAMERINI, Isabel Giron et al. Machine learning assisted cement integrity evaluation during plugging and abandonment operations. In: ADIPEC – Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 2023. Paper SPE-216950-MS. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers, 2023. DOI: <https://doi.org/10.2118/216950-MS>.
- [45] WEATHERFORD. BondView™ Tool. Disponível em: <https://www.weatherford.com/products-and-services/drilling-and-evaluation/wireline-products/well-integrity-tools/bondview-tool/>. Acesso em: 12 março 2025.
- [46] WEATHERFORD. UltraView™ Tool. Disponível em: <https://www.weatherford.com/products-and-services/drilling-and-evaluation/wireline-products/well-integrity-tools/ultraview-tool/>. Acesso em: 12 março 2025.
- [47] SLB. Cement bond logging tools. Disponível em: <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/well-cementing/cement-evaluation/cement-bond-logging-tools>. Acesso em: 12 março 2025.
- [48] HALLIBURTON. CAST-XRT™ Cement Evaluation Tool – Data Sheet. Disponível em: <https://www.halliburton.com/en/resources/cast-xrt-cement-evaluation-tool-data-sheet>. Acesso em: 12 março 2025.

- [49] BAKER HUGHES. Radial Bond Tool. Disponível em: <https://www.bakerhughes.com/gaffneycline-energy-advisory/geoscience/wireline-well-integrity-evaluation/cement-evaluation/radial-bond-tool>. Acesso em: 12 março 2025.
- [50] GOWELL. Cased Hole Logging Tools. Disponível em: <https://www.gowellpetro.com/new-cased-hole>. Acesso em: 12 março 2025.
- [51] HUNTING PLC. Perforating & Logging Systems. Disponível em: <https://huntingplc.com/products-services/perforating-logging-systems/>. Acesso em: 12 março 2025.
- [52] American Petroleum Institute (API) (2020). API Specification 10A: Cements and Materials for Well Cementing.
- [53] HIBBELER, R. C. Estática: Mecânica para Engenharia. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2017.
- [54] BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. Shigley's Mechanical Engineering Design. 10. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [55] ISO. ISO 898-1: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel.
- [56] LIU, Y.; D'ANGELO, R. M.; CHOI, G.; ZHU, L.; PATEL, M.; BOSE, S.; ZERoug, S.; MERCIU, I. A.; CONSTABLE, K. Experimental investigation of acoustic features associated with cement damages in double cased-wellbores. In: AIP Conference Proceedings, v. 2102, n. 1, p. 050024, 2019. Richardson, TX: AIP Publishing LLC.
- [57] DE SOUZA, L. P. B. et al. Machine learning-based cement integrity evaluation with a through-tubing logging experimental setup. Geoenergy Science and Engineering, v. 227, p. 211882, 2023.
- [58] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Specification 5CT: Casing and Tubing. 11. ed. Washington, DC: API, 2024.
- [59] OBERG, Erik et al. Machinery's handbook. 29. ed. New York: Industrial Press, 2012.
- [60] ASME. ASME B1.8 – Stub Acme Screw Threads.
- [61] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60812: Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). 3. ed. Geneva: IEC, 2018.
- [62] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61025: Fault tree analysis (FTA). 2. ed. Geneva: IEC, 2006.

- [63] LEE, W. S.; GROSH, D. L.; TILLMAN, F. A.; LIE, C. H. Fault Tree Analysis, Methods, and Applications – A Review. IEEE Transactions on Reliability, v. R-34, n. 3, p. 194-203, 1985.
- [64] GATES CORPORATION. PowerGrip® GT®2 Belt Drive Design Manual. Denver: Gates Corporation, 2014.
- [65] ORIENTAL MOTOR. Motor Sizing Calculations. Technical Reference. Tokyo: Oriental Motor Co., Ltd., 2025. Disponível em: <https://www.orientalmotor.com/technology/motor-sizing-calculations.html>. Acesso em: 23 mar. 2025.
- [66] F. G. S. Souza, Análise da Integridade da Cimentação de Poços de Petróleo Utilizando Perfis Acústicos Convencionais e Redes Neurais Artificiais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, Brasil., 2022.
- [67] Li, H., Kbaied, T., Contreras, A., James, G., & Li, J. (2022). Well integrity evaluation using acoustic and electromagnetic measurements. The Leading Edge, 41(2), 122-130.
- [68] Jutten, J. J., & Parcevaux, P. (1987). Relationship between Cement Bond Log output and sonic attenuation in cement systems. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro.
- [69] WANG, H.; TAO, G.; SHANG, X. Understanding acoustic methods for cement bond logging. Journal of the Acoustical Society of America, Melville, NY, v. 139, n. 5, p. 2407-2416, 2016.