

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

AGESINALDO MATOS SILVA JUNIOR

MEDIÇÃO POR ULTRASSOM DO TEOR DE PARTÍCULAS
SÓLIDAS EM MEIOS LÍQUIDOS APLICADA À INDÚSTRIA
DE PETRÓLEO

São Paulo

2010

AGESINALDO MATOS SILVA JUNIOR

**MEDIÇÃO POR ULTRASSOM DO TEOR DE PARTÍCULAS
SÓLIDAS EM MEIOS LÍQUIDOS APLICADA À INDÚSTRIA
DE PETRÓLEO**

Relatório Final para a disciplina PMR-2550:
Projeto de Conclusão de Curso II.

Área de Concentração: Mecatrônica e Sistemas
Mecânicos

Orientador: Prof. Dr. Julio Cezar Adamowski

São Paulo

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva Jr, Agesinaldo Matos

Medição por ultrassom do teor de partículas sólidas em meios líquidos aplicada à indústria do petróleo, São Paulo, 2010.

61 p.

Projeto de Conclusão de Curso – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos .

1.Ultrassom 2.Partículas sólidas
3.Espalhamento 4.Petróleo I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

RESUMO

Os ensaios de laboratório na indústria de petróleo para a determinação do teor de areia em óleo são realizados periodicamente utilizando técnicas de separação por peneiramento. Este tipo de ensaio objetiva determinar o nível de deterioração do poço e avaliar o risco e a produtividade da plataforma de extração de petróleo. No presente projeto será implementado um método de medição por ultrassom utilizando a técnica do espalhamento. Inicialmente serão realizados ensaios testes com a montagem de uma bancada experimental que inclui tanque de medição, sistema de aquisição e pós-processamento. Os ensaios a serem realizados com esta montagem têm por objetivo analisar a influência do teor e granulometria de partículas sólidas sobre os parâmetros acústicos de amostras de misturas em água. Será desenvolvido um modelo de retro-espalhamento baseado na teoria da resposta impulsiva de um pistão plano e os resultados obtidos devem mostrar a mesma correlação entre a quantidade de areia e a energia acústica retro-espalhada. Em seguida, será construído um protótipo de um dispositivo dosador com o propósito de preparar amostras com teores bem definidos de partículas. Serão utilizados os programas Autodesk Inventor[®] e MATLAB[®] e um microcontrolador Rabbit[®]. Um estudo experimental sobre o petróleo será realizado utilizando uma célula de medição para caracterização de líquidos.

Palavras-chave: Ultrassom, Espalhamento, Partículas sólidas, Petróleo.

ABSTRACT

Laboratory tests in the petroleum industry for determining the sand content in oil are carried out periodically using separation techniques by screening. This type of test objective determine the level of deterioration of the well and evaluate the risk and productivity of oil-drilling platform. In this project will implement a method of measurement using the ultrasound technique from scattering. Initially, tests will be conducted tests with assembling a bench trial that includes tank measurement acquisition system and post-processing. The tests to be performed with this setup have to analyze the influence of content and particle size of solid particles on the acoustic parameters of mixtures in water samples. Will develop a backscattering model based on the theory of the impulse response of a plane piston and the results should show the same correlation between the amount of sand and acoustic backscatter energy. Then a prototype will be built a feeder device in order to prepare samples with well-defined levels of particles. Will be used the Autodesk[®] Inventor and MATLAB[®] software and a Rabbit[®] microcontroller. An experimental study on oil will be carried out using a measuring cell for characterization of liquids.

Palavras-chave: Ultrasound, Scattering, Solid Particle, Oil.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	ix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
2 Revisão da Literatura	3
2.1 Sensores Acústicos	3
2.1.1 Sensores físicos em líquidos	3
2.1.2 Transdutores piezoelétricos	4
2.2 Espalhamento	5
2.2.1 Espalhamento múltiplo	5
2.3 Medição do teor de partículas sólidas em meios líquidos	7
2.4 Aplicação na indústria do petróleo	8
3 Fundamentos Teóricos	9
3.1 Ondas acústicas	9
3.1.1 Equação da onda	9
3.1.2 Parâmetros de propagação	11
3.2 Efeitos do meio sobre a propagação	13
3.2.1 Transmissão e reflexão	13
3.2.2 Atenuação do som	15

3.2.2.1	Absorção	15
3.3	Radiação e reflexão de um pistão plano circular	16
3.4	Propriedades do óleo	18
4	Metodologia	20
5	Resultados e Análises	22
5.1	Desenvolvimento do tanque de testes	22
5.1.1	Formato e materiais	22
5.1.2	Projeto	24
5.1.3	Protótipo	25
5.2	Ensaio com amostras padronizadas de areia	28
5.2.1	Preparação das amostras e procedimentos de ensaios	28
5.2.2	Resultados e análise	31
5.3	Simulações dos fenômenos acústicos	33
5.3.1	Resultados e análises	34
5.4	Dosador automático	37
5.4.1	Projeto do dosador automático	37
5.4.2	Implementação	38
5.4.3	Calibração	41
5.5	Geração e aquisição de sinais	43
5.5.1	Interface integrada à aquisição	45
5.6	Integração do sistema	45
5.6.1	Subsistemas	45
5.6.2	Interface integrada ao comando do dosador	46
5.7	Ensaio com partículas de microesferas de vidro	47
5.7.1	Identificação e caracterização das partículas	47

5.7.2	Realização dos ensaios	48
6	Conclusões.....	51
6.1	Trabalhos futuros	52
	Referências	53
	Anexo A – Desenhos técnicos	55
	Anexo B – Fotos	57

LISTA DE FIGURAS

Figura – 2.1	Ilustração do fenômeno de espalhamento	5
Figura – 2.2	Ilustração do fenômeno de espalhamento múltiplo	6
Figura – 3.1	Diagrama do volume de controle fixo mostrando a taxa de fluxo de massa	9
Figura – 3.2	Superfície de fase constante de um onda plana harmônica propagando na direção z	11
Figura – 3.3	Reflexão e transmissão de uma onda plana de incidência normal em uma interface plana entre dois fluidos de impedâncias características diferentes	14
Figura – 3.4	Modelo do pistão plano circular.	17
Figura – 3.5	Diagrama de blocos do aparato experimental	18
Figura – 5.1	Modelo do tanque em detalhe	24
Figura – 5.2	Modelo do adaptador com um transdutor inserido	25
Figura – 5.3	Esquema de montagem do transdutor no adaptador	27
Figura – 5.4	Esquema de montagem do adaptador no tanque	28
Figura – 5.5	Desenho esquemático da célula de detecção de areia na bancada de testes	29
Figura – 5.6	Exemplo de sinal adquirido através do retro-espalhamento	30
Figura – 5.7	Fotografia de grãos de areia utilizados nos experimentos	30
Figura – 5.8	Energia acústica retroespalhada medida com o transdutor de 10 MHz	31
Figura – 5.9	Série temporal correspondente a análise da energia acústica retroespalhada das sequências de ensaios	32
Figura – 5.10	Exemplo de sinal simulado através do retro-espalhamento	35
Figura – 5.11	Exemplo de série temporal simulada da energia média de cada a-scan durante um período de ensaio	35

Figura – 5.12	Energia acústica retroespalhada do ensaio usando o programa de simulação	35
Figura – 5.13	Diagrama de blocos da rotina de simulação	36
Figura – 5.14	Modelo de acionamento dos motores de passo	38
Figura – 5.15	Esquema de montagem para calibração do comando do dosador ..	40
Figura – 5.16	Curva experimental ajustada de frequência de saída de pulsos ..	40
Figura – 5.17	Esquema de montagem para calibração do dispositivo dosador ..	41
Figura – 5.18	Exemplo de calibração do dispositivo dosador	42
Figura – 5.19	Diagrama de blocos do sistema de aquisição de ensaio	44
Figura – 5.20	Exemplo de pulso de tensão negativa aplicado ao terminal do transdutor	44
Figura – 5.21	Diagrama de casos de uso do módulo de aquisição	45
Figura – 5.22	Diagrama de blocos do sistema integrado de ensaio	46
Figura – 5.23	Diagrama de casos de uso da do módulo de dosagem	46
Figura – 5.24	Diagrama de casos de uso do módulo de integração	47
Figura – 5.25	Imagem das microesferas de vidro do tipo RD retirada através de uma câmera digital CCD.	48
Figura – 5.26	Exemplo de série temporal da energia média de cada a-scan durante um período de ensaio	49
Figura – 5.27	Energia acústica retroespalhada do ensaio com partículas de microesferas de vidro.	49
Figura – A.1	Desenho técnico da alça	55
Figura – A.2	Desenho técnico do fundo	56
Figura – A.3	Desenho técnico do adaptador	56
Figura – B.1	Foto do tanque	57
Figura – B.2	Foto do adaptador	58
Figura – B.3	Foto do detalhe do tanque	58
Figura – B.4	Foto da célula de detecção de areia	59
Figura – B.5	Foto do mecanismo alimentador	59

Figura – B.6	Foto do mecanismo raspador	60
Figura – B.7	Foto da placa de desenvolvimento	60
Figura – B.8	Foto dos drivers de motor de passo - Geckodriver's	60
Figura – B.9	Foto da montagem para calibração do dispositivo dosador	61
Figura – B.10	Foto do sistema integrado de ensaio	61

LISTA DE TABELAS

Tabela – 3.1	Características da amostra de óleo.	19
Tabela – 5.1	Impedância acústica dos materiais utilizados.	23
Tabela – 5.2	Coeficientes de Reflexão e Transmissão.	24
Tabela – 5.3	Ensaio preliminares - Coeficientes da curva ajustada.	33
Tabela – 5.4	Acionamento dos motores de passo.	39
Tabela – 5.5	Calibração do dosador - Coeficientes da curva ajustada.	42
Tabela – 5.6	Funções do equipamento USBox utilizadas para ajuste dos ensaios.	44
Tabela – 5.7	Granulometria usuais retirado do site do fabricante.	48
Tabela – 5.8	Calibração do medidor - Coeficientes da curva ajustada.	49

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	— densidade instantânea
ρ_0	— densidade no equilíbrio
s	— condensação
∇	— nabla
\vec{u}	— velocidade de partícula
p	— pressão acústica
c	— velocidade termodinâmica do som
c_p	— velocidade de fase
K	— módulo de elasticidade volumétrica
k	— número de onda
ω	— frequência angular
λ	— comprimento de onda
E_k	— energia cinética
E_p	— energia potencial
E	— energia total
V	— volume
$I(t)$	— intensidade acústica instantânea
I	— média temporal da intensidade acústica
z	— impedância acústica específica
r	— impedância acústica característica
\mathbf{P}_i	— amplitude de pressão complexa da onda incidente
\mathbf{P}_r	— amplitude de pressão complexa da onda refletida
\mathbf{P}_t	— amplitude de pressão complexa da onda transmitida
T	— coeficiente de transmissão
R	— coeficiente de reflexão
T_I	— coeficiente de transmissão de intensidade
R_I	— coeficiente de reflexão de intensidade
α	— coeficiente de absorção espacial

LISTA DE ABREVIATURAS

PMR	— Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos
NIRS	— <i>Near Infra Red Spectroscopy</i>
PMI	— Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
EPUSP	— Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
IPT	— Instituto de Pesquisa Tecnológica
DPQ	— Departamento de Processos Químicos
FEQ	— Faculdade de Engenharia Química
Unicamp	— Universidade Estadual de Campinas
ISO	— International Organization for Standardization
END	— <i>Ensaio não-destrutivo</i>
NDT	— <i>Non-Destructive Testing</i>
BNC	— <i>Bayonet Neill-Concelman</i>
ABS	— <i>Acoustic Backscatter Systems</i>
TSM	— <i>Thickness Shear Resonator</i>
SH	— <i>Shear Horizontal</i>
FPW	— <i>Flexural Plate Wave</i>
TDE	— Transdutor duplo-elemento

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A produção de petróleo em arenitos inconsolidados ou pobremente consolidados normalmente gera produção de areia. Se essa produção for alta, pode ocasionar limitações na produção do poço, danificar equipamentos, gerar parada total da produção, perda de controle do poço, causar incêndios, danos ao meio ambiente e perdas de vidas. Assim sendo, o monitoramento do teor de areia produzido junto com o petróleo é usado como parâmetro para avaliar o nível de deterioração do poço, o risco de desabamento de poços horizontais e a produtividade da plataforma de extração de petróleo. Atualmente existe uma literatura muito extensa de técnicas de ultrassom utilizadas em ensaios não destrutivos (END), assim como de métodos de medição concentração de partículas sólidas em suspensão em meios líquidos. A utilização de ensaios não destrutivos para medir a concentração de partículas é altamente visada na indústria por ser não intrusiva e não invasiva não interferindo no processo produtivo do material.

Uma das técnicas utilizadas é a da atenuação ultrassônica, que tem por princípio o espalhamento da onda acústica. Portanto, este trabalho tem como principal objetivo a compreensão dos principais mecanismos de atenuação acústica em meios não-homogêneos verificando suas dependências em função da concentração, dimensões das partículas, propriedades dos meios envolvidos, visando a aplicação na medição de teor de areia durante a extração de petróleo. Os resultados experimentais utilizando transdutores piezelétricos disponíveis no laboratório de Ultrassom da Escola Politécnica da USP e um tanque de medição que será montado durante o projeto serão comparados com modelos de espalhamento acústico por esferas sólidas encontrados na literatura.

1.2 Objetivos

Desenvolver uma metodologia que permita estudar os fenômenos acústicos que ocorrem com a propagação de ondas acústicas em meios heterogêneos contendo misturas de sólidos em líquidos, como partículas de areia ou de microesferas de vidro suspensas em água ou petróleo. Os objetivos específicos podem ser enumerados na lista a seguir:

- Projetar e construir uma bancada experimental capaz de realizar ensaios por ultrassom para determinação do teor de partículas sólidas em suspensão em meio líquido;
- Apresentar um modelo empírico que correlacione parâmetros acústicos com a concentração de partículas nessas misturas;
- Projetar e construir uma célula de medição adaptável a uma tubulação que possa ser utilizada para realizar ensaios não-destrutivos (END) em amostras de óleo com areia;
- Estudar a viabilidade técnica de aplicação dessa célula de medição na indústria de petróleo;

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Sensores Acústicos

Sensores são dispositivos projetados para detectar a presença de uma propriedade física, química ou biológica e, através de um transdutor apropriado, transformar a quantidade detectada em um sinal elétrico. Sensores, em geral, são de muitos tipos, baseados em mecanismos sensíveis que podem ser elétricos, ópticos, acústicos, magnéticos e etc. Os sensores que serão aqui discutidos são do tipo micro sensores acústicos, ou seja, aqueles que são fabricados com microeletrônica e integrados a circuitos híbridos. Diferentes tipos de sensores acústicos que se baseiam em diferentes modos de propagação.

2.1.1 Sensores físicos em líquidos

Esta seção tem por objetivo fazer uma breve introdução no assunto de sensores físicos em líquidos e apresentar algumas aplicações que servirão de exemplo e base técnica para o atual trabalho.

Densidade do líquido é um parâmetro importante para controle de qualidade na maioria das indústrias. O conhecimento da densidade é essencial para a determinação de fluxo de massa e viscosidade por métodos acústicos. Em geral, a densidade do líquido é medida através do coeficiente de reflexão da onda longitudinal de incidência normal para um sólido conhecido em contato com o líquido a ser medido [1]. Para esse método ser preciso é importante escolher um sólido com baixo coeficiente de atenuação com impedância acústica não muito maior que a do líquido.

Assim como na medição de densidade, os sensores de viscosidade são utilizados em uma grande variedade de processos industriais. Os métodos de sensoriamento utilizam abordagens de medição baseados em ondas ultrassônicas cisalhantes [2]. A viscosidade do líquido pode ser associada à interface sólido-líquido através de ondas cisalhantes e sua determinação geralmente está acompanhada do conhecimento da densidade do líquido.

A determinação do teor de partículas em misturas homogêneas líquido-líquido também é uma aplicação bastante visada, principalmente na indústria alimentícia. Os métodos utilizados são baseados em modelos que correlacionam parâmetros acústicos como velocidade de propagação e atenuação da onda com o teor de partículas [3]. Métodos como esse sofrem influência de outras grandezas físicas, como a temperatura e exigem a calibração com diferentes métodos convencionais.

Outras aplicações podem ser citadas utilizando sensores ultrassônicos em líquidos, como por exemplo, sensoramento de temperatura, vazão e nível. Em todos os casos, é comum que se utilize transdutores ultrassônicos para obter parâmetros acústicos como velocidade de propagação e tempo de voo e então, de forma indireta, a temperatura, vazão ou nível.

2.1.2 Transdutores piezoelétricos

Há um número muito grande de formas de se usar transdutores piezoelétricos ultrassônicos em uma diversidade de aplicações. Entre elas podem ser citadas: linhas de atraso, acoplamento com sólidos para ensaios não-destrutivos, emissão em meio aquoso, ressonadores, etc. Um elemento transdutor ultrassônico é um corte de um cristal piezoelétrico, do qual ondas longitudinais ou transversais podem ser emitidas perpendicularmente às faces planas. Eletrodos são aplicados às faces opostas de forma a produzir uma diferença de potencial gerando um campo elétrico uniforme na direção perpendicular. Transdutores para aplicação em campo são empacotados como uma caixa preta e possuem um conector BNC ¹, com o qual pode se conectar a outros dispositivos. Dessa forma o transdutor pode ser considerado como um sistema de 3 portas (duas acústicas e uma elétrica).

De maneira geral, esses transdutores podem ser classificados entre *loaded* e *unloaded* ². A operação de um transdutor próximo da ressonância pode ser mais bem entendida com os transdutores *unloaded*. A impedância acústica específica de suas faces livres é nula $Z_1 = Z_2 = 0$ e servem de base para o funcionamento de um ressonador acústico. Porém, somente os transdutores *loaded* são utilizados em aplicações práticas. Sua resposta em frequência depende da razão entre as impedâncias acústicas do transdutor e dos meios aos quais suas faces estão acopladas. A escolha da melhor configuração do transdutor depende da aplicação e se baseia a relação de compromisso entre largura de banda, sensibilidade da resposta impulsiva e considerações das perdas.

¹Bayonet Neill-Concelman: um conector de rádio frequência muito comum utilizado para terminais de cabos coaxiais

²Trad. Carregado e descarregado, respectivamente

2.2 Espalhamento

O espalhamento de ondas acústicas por obstáculos de vários tipos é um assunto altamente desenvolvido e muito sofisticado matematicamente como na maioria dos ramos da física [4]. Este assunto foi primeiramente investigado matematicamente por Lord Rayleigh [5]. Este fenômeno pode ser ilustrado de forma simplificada na Fig. (2.1). Em outras áreas, os resultados analíticos principais podem ser simplificados para o caso em que o comprimento de onda ou é muito maior ou muito menor que a dimensão característica do obstáculo. O problema se torna muito mais difícil, às vezes intratável, quando o comprimento de onda é da ordem de sua dimensão.

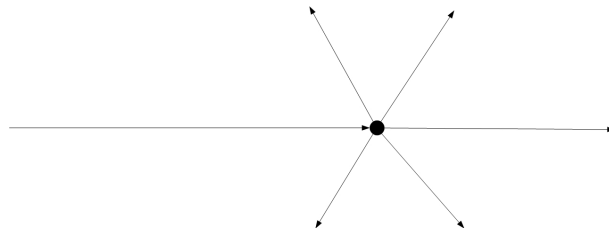


Figura 2.1: Ilustração do fenômeno de espalhamento

Em princípio, para o caso de radiação, o campo acústico espalhado pode ser determinado pelo princípio de Huygens ³, somando as ondas emitidas por fontes secundárias sobre a superfície do obstáculo, levando em consideração suas amplitudes e fases relativas. Esse problema é geralmente intratável para um corpo de tamanho e formato arbitrários, porém pode ser estudado em termos de área transversal de espalhamento e fator de forma [4]. Para o espalhamento por objetos simples, dois parâmetros podem ser usadas para representar o fenômeno: diagrama polar e total da intensidade espalhada como funções da frequência. O diagrama polar é altamente útil porque ele dá uma pista visual imediata da intensidade do som espalhada em uma dada direção. O total de intensidade espalhada é mostrado como função de ka onde k é número de onda e a a dimensão característica do centro de espalhamento[6].

2.2.1 Espalhamento múltiplo

O espalhamento múltiplo de ondas acústicas ocorre em uma variedade de situações e materiais. Está geralmente associado com a propagação em meio não-homogêneo e pode ser

³O princípio de Huygens diz que cada ponto pertencente a uma frente de onda se comporta como uma nova fonte pontual de emissão de novas ondas esféricas, que ao se somarem formarão uma nova frente de onda

exemplificado com a Fig. (2.2). Um dos primeiros trabalhos a apresentar uma teoria geral para o espalhamento isotrópico distribuído aleatoriamente trata este assunto introduzindo um conceito estatístico de aleatoriedade ⁴[7]. Outro autor também estuda o espalhamento múltiplo, mas faz um tratamento desse fenômeno com ênfase no espalhamento da luz [8]. Atualmente, as áreas de aplicação mais importantes incluem oceanografia, exploração de petróleo dentre outras.

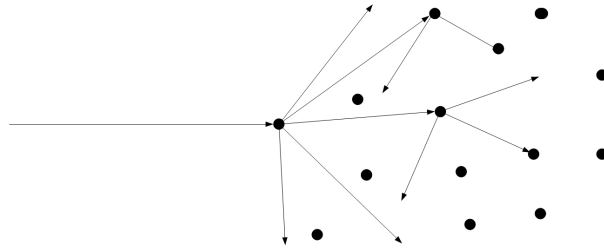


Figura 2.2: Ilustração do fenômeno de espalhamento múltiplo

O retro-espalhamento é uma característica particular desse fenômeno, sendo assunto de muitas pesquisas e aplicações de engenharia [9]. Neste caso, o espalhamento é descrito em termos de uma função angular e avaliada a 180° . Esta particularidade tem sido explorada recentemente para estudar como ocorre o espalhamento em suspensões ⁵ de partículas sólidas, em particular de partículas de areia [10] [11] [12]. Outros trabalhos também fazem referência ao fenômeno em um âmbito mais geral seguindo a mesma linha de aplicação [13] [14].

Diversas teorias tem sido formuladas no sentido de calcular o número de onda, k , de ondas de compressão que se propagam em meios homogêneos em misturas como, líquido-líquido, sólido-líquido e sólido-sólido. As principais formulações foram resumidas, analisadas e comparadas com resultados experimentais utilizando ondas de ultrassom [15]. Neste mesmo caminho, foram desenvolvidos programas de simulação de propagação de ondas de ultrassom em suspensões de partículas rígidas, resultando em uma validação experimental [16].

⁴A palavra aleatoriedade é utilizada para exprimir quebra de ordem, propósito, causa. Um processo aleatório é o processo repetitivo cujo resultado não descreve um padrão determinístico, mas segue uma distribuição de probabilidade.

⁵Suspensão é um tipo de mistura formada por duas ou mais fases (mistura heterogênea). Existem a fase externa que normalmente é um líquido e a fase interna formado por partículas sólidas insolúveis na parte externa

2.3 Medição do teor de partículas sólidas em meios líquidos

Diversas técnicas de medição do teor de partículas estão presentes na literatura, algumas antigas, como a sedimentação e outras mais recentes utilizando equipamentos de difração a laser, atenuação de raios gama ou também a técnica de espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS).

Em pesquisa realizada em instituições como no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo (PMI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT) e Departamento de Processos Químicos (DPQ) da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), observou-se a intensa utilização de equipamentos que exigem preparação de pequenas amostras da mistura analisada.

Foram poucos os equipamentos encontrados que se baseiam em técnicas de ultrassom para medir tamanho de partículas e sua concentração em suspensões e/ou emulsões. Todos possuem desenvolvimento muito recente e assumem que as teorias de espalhamento acústico ainda são pouco aplicáveis a partículas irregulares.

O equipamento comercial da Dispersion[®] modelo DT-100 realiza o dimensionamento da distribuição do tamanho de partículas (PSD) em emulsões. A técnica utilizada por esse equipamento é a espectroscopia acústica ⁶ cuja diretrizes encontram-se na norma ISO 20998-1[17]. O método utilizado para análise do PSD obtido assume que as partículas da amostra são esferas imersas em água e considera a ocorrência apenas de espalhamento simples ao longo da transmissão do pulso propagado [18].

Já o equipamento da Aquatec[®] modelo AQUAscatter 1000 realiza medições de perfis de suspensão de partículas aplicados a transporte de sedimentos em rios e em água costais e necessita de calibrações em laboratório. A técnica utilizada por esse equipamento é o retro-espalhamento acústico (ABS)[19]. Essa técnica está sendo exaustivamente estudada por Thorne, permitindo obter maior acurácia na calibração do instrumento. Dos artigos publicados, os que mais se destacam são: [20] [21] [22] [23] e procuram obter parâmetros que melhoram a análise dos resultados obtidos através da técnica.

⁶Medição do coeficiente de atenuação versus ultrassom de frequência produz dados brutos para o cálculo do adicional de diversas propriedades do sistema.

2.4 Aplicação na indústria do petróleo

As considerações que são feitas ao tratar problemas de medição por ultrassom envolvendo óleo estão relacionadas principalmente a suas características heterogêneas, elevada viscosidade e atenuação acústica. É importante considerar a influência desses parâmetros na modelagem de qualquer sistema que envolva o óleo. Essas e outras propriedades como velocidade de propagação do som e densidade podem ser obtidas a partir de diversas técnicas. Uma dessas técnicas está descrita na seção 3.4 e pode ser utilizada para quantificar os parâmetros usados na avaliação da viabilidade técnica de aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Ondas acústicas

Ondas acústicas são um tipo de perturbação do campo de pressão que podem existir em um meio elástico. Quando estas perturbações se encontrarem em uma faixa de frequência audível, é chamada de ondas sonoras. Caso se encontrem abaixo ou acima das frequências audíveis são chamadas, respectivamente, de ondas infrassônicas ou ultrassônicas. Fluidos invíscidos possuem menor restrição a deformações do que os sólidos. As mudanças de pressão devido à expansão e compressão do fluido geram forças de restauração que são responsáveis pela propagação da onda. Os elementos do fluido se movem para frente e para trás na direção dessas forças, produzindo regiões adjacentes de compressão e rarefação como numa onda mecânica longitudinal em uma barra.

3.1.1 Equação da onda

O movimento de compressão ou expansão do fluido pode ser explicado analisando a relação entre a velocidade da partícula e sua densidade instantânea. A equação da continuidade permite fazer essa análise a partir de um volume de controle fixo ilustrado na Fig. (3.1). pode-se analisar um fluido escoando na direção x a partir do diagrama a seguir. A taxa com a qual a massa flui para dentro desse volume através de sua superfície deve ser igual a taxa com que a massa cresce dentro dele.

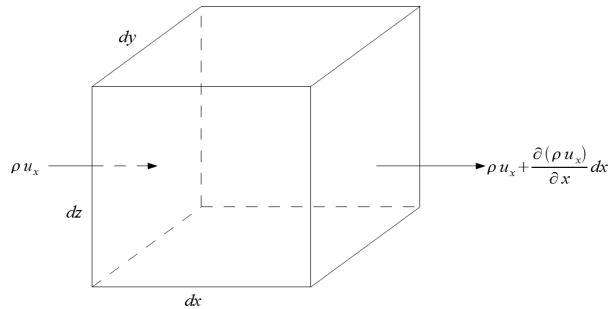


Figura 3.1: Diagrama do volume de controle fixo mostrando a taxa de fluxo de massa

O diagrama sugere a equação da continuidade na forma linearizada,

$$\begin{aligned}\rho_0 \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \vec{u}) &= 0 \\ s &= (\rho - \rho_0)/\rho_0\end{aligned}\tag{3.1}$$

onde s = condensação

As considerações a respeito da condensação em termos da termodinâmica pode ser encontrada no livro de fundamentos de acústica [24].

Introduz-se um elemento que se move com o fluido e que acelera devido a uma flutuação na pressão estática. Com isso, pode-se utilizar a segunda lei de Newton para obter na equação de Euler para fluidos invíscidos na forma linearizada.

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p = 0\tag{3.2}$$

Derivando no tempo a Eq. (3.1) e tomando o divergente da Eq. (3.2), obtem-se

$$\begin{aligned}\nabla^2 p &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \\ c^2 &= K/\rho_0\end{aligned}\tag{3.3}$$

onde:

c = velocidade termodinâmica do som,

K = módulo de elasticidade volumétrica;

A Eq. (3.3) é a equação de onda linear sem perdas para propagação do som em fluidos com velocidade c . A solução da Eq. (3.3) para uma onda plana harmônica propagando em uma dada direção e sentido é,

$$\begin{aligned}\mathbf{p} &= \mathbf{A} \exp^{j(\omega t - kz)} \\ k &= \omega/c = 2\pi/\lambda\end{aligned}\tag{3.4}$$

onde:

\mathbf{A} = constante complexa definida pelas condições de contorno,
 k = número de onda na direção de propagação,
 λ = comprimento de onda na direção de propagação;

Essa solução introduz o conceito de superfície de fase constante e a onda pode ser entendida como frentes de onda que se propagam com uma velocidade chamada velocidade de fase, c_p . A Fig. (3.2) ilustra esse conceito para uma onda plana harmônica propagando na direção z .

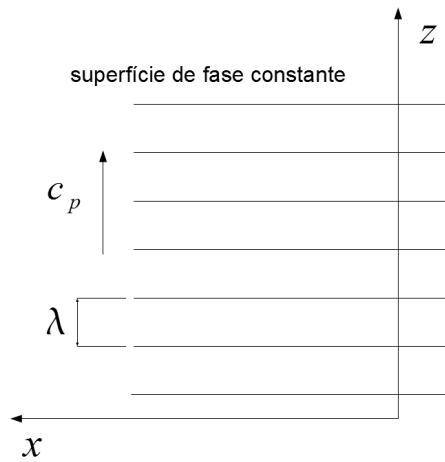


Figura 3.2: Superfície de fase constante de um onda plana harmônica propagando na direção z

Dessa forma, a Eq. (3.3) pode ser reescrita sob a forma da equação de Helmholtz.

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (3.5)$$

3.1.2 Parâmetros de propagação

A energia transportada por uma onda acústica através de um meio fluido encontra-se na forma de energia cinética e potencial. A energia cinética associada a um elemento fluido em movimento é dada por

$$E_k = \frac{1}{2} \rho_0 V_0 u^2 \quad (3.6)$$

e a variação de energia potencial do fluido devido a sua compressão

$$E_p = - \int_{V_0}^V p dV \quad (3.7)$$

Fazendo uma mudança de variável, integrando a Eq. (3.7) e tomando aproximações lineares, podemos expressar a energia total de um elemento volumétrico por

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} \rho_0 V_0 [u^2 + (p/\rho_0 c)^2] \quad (3.8)$$

Para uma onda harmônica plana propagando na direção $\pm z$ a pressão pode ser considerada igual a $p = \pm \rho_0 c u$ e, portanto, a densidade de energia instantânea pode ser expressa por

$$E_i = \rho_0 u^2 = p^2 / \rho_0 c^2 \quad (3.9)$$

Realizando-se a média temporal da Eq. (3.9) em qualquer ponto do fluido, obtém-se

$$\langle E \rangle = PU/2c = P^2/2\rho_0 c^2 = \rho_0 U^2/2 \quad (3.10)$$

onde:

E = densidade de energia,

P = amplitude da pressão acústica,

U = velocidade da partícula;

A intensidade instantânea $I(t)$ de uma onda acústica é a taxa instantânea no qual um elemento fluido realiza trabalho em um elemento adjacente por unidade de área e é dada por $I(t) = pu$ (W/m^2). A média temporal de $I(t)$ é definida como intensidade $\langle I \rangle$. O elemento fluido considerado para uma onda plana propagando na direção $\pm z$ possui superfície da secção transversal plana e a intensidade que o atravessa é dada por,

$$\langle I \rangle = \pm P^2/2\rho_0 c \quad (3.11)$$

A impedância acústica específica é definida como a razão entre a pressão acústica e a velocidade de uma partícula em um meio. Para ondas planas essa razão é dada por

$$\begin{aligned} \mathbf{z} &= \mathbf{p}/\mathbf{u} \\ \mathbf{z} &= \pm \rho_0 c \end{aligned} \quad (3.12)$$

O produto $\rho_0 c$ é considerado uma propriedade característica do meio, sendo chamado de impedância acústica característica:

$$r = \rho_0 c \quad (3.13)$$

Dessa forma, a intensidade de uma onda progressiva plana harmônica pode ser reescrita como

$$\langle I \rangle = P^2/2r \quad (3.14)$$

3.2 Efeitos do meio sobre a propagação

A propagação de ondas elásticas, em particular as de pressão acústica, sofre efeito do meio de propagação. As considerações feitas na seção anterior são aplicáveis a elementos de fluidos e volumes de controle e a propagação de ondas em meios homogêneos, isotrópicos e infinitos. As aplicações de ultra-som são geralmente relacionadas a fontes que irradiam ondas acústicas em meios com continuidade limitada. A modelagem dos efeitos do meio sobre a propagação é crucial para o entendimento do comportamento da onda.

3.2.1 Transmissão e reflexão

Se um meio apresenta uma interface separando-o de um segundo meio, a onda acústica que se propaga entre esses meios sofre reflexão e transmissão. A relação entre as amplitudes de pressão e suas intensidades das ondas refletidas e transmitidas está ligada às características acústicas como impedância característica, velocidade do som nos dois meios e ao ângulo entre a direção da onda incidente e a direção normal à interface. Pode-se definir o coeficiente de transmissão e reflexão de pressão como sendo a razão entre a amplitude de pressão complexa da onda transmitida e refletida respectivamente e da onda incidente

$$\mathbf{T} = \mathbf{P}_t/\mathbf{P}_i \quad (3.15)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{P}_r/\mathbf{P}_i \quad (3.16)$$

onde:

\mathbf{P}_i = amplitude de pressão complexa da onda incidente,

\mathbf{P}_r = amplitude de pressão complexa da onda refletida,

\mathbf{P}_t = amplitude de pressão complexa da onda transmitida;

Esses coeficientes são facilmente calculados para uma situação em que há uma onda plana de incidência normal em uma interface plana entre dois fluidos de impedâncias característica diferentes, conforme ilustra a Fig. (3.3):

$$\mathbf{T} = \frac{2r_2/r_1}{r_2/r_1 + 1} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{R} = \frac{r_2/r_1 - 1}{r_2/r_1 + 1} \quad (3.18)$$

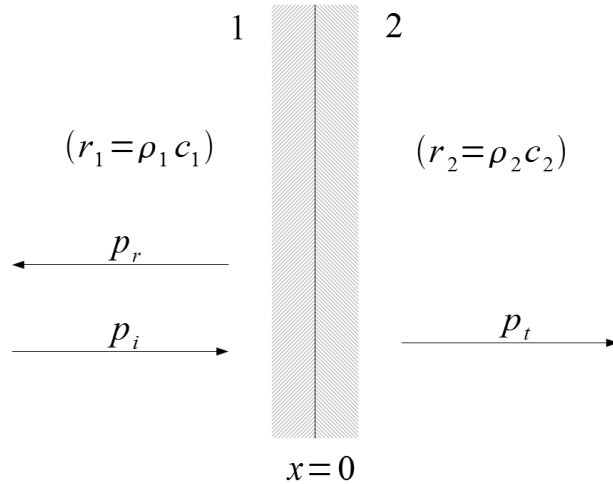


Figura 3.3: Reflexão e transmissão de uma onda plana de incidência normal em uma interface plana entre dois fluidos de impedâncias característica diferentes

Considerando a Eq. (3.14) defini-se os coeficientes de transmissão e reflexão de intensidade como

$$T_I = I_t/I_i = (r_1/r_2) |\mathbf{T}|^2 \quad (3.19)$$

$$R_I = R_t/R_i = |\mathbf{R}|^2 \quad (3.20)$$

onde r_1 e r_2 são as impedâncias característica dos meios 1 e 2 respectivamente mostrados na Fig. (3.3).

Em muitos casos, as ondas acústicas podem ser consideradas como de raios de propagação. Essa consideração é baseada na suposição de que a energia acústica é transportada por caminhos bem definidos através do meio de propagação. Esses raios definem um feixe de som com área de secção transversal finita. De acordo com as condições de contorno do problema, pode-se reescrever as seguintes relações [24]:

$$T_I = \frac{4\mathbf{z}_2/\mathbf{z}_1}{(\mathbf{z}_2/\mathbf{z}_1 + 1)^2} \quad (3.21)$$

$$R_I = \frac{(\mathbf{z}_2/\mathbf{z}_1 - 1)^2}{(\mathbf{z}_2/\mathbf{z}_1 + 1)^2} \quad (3.22)$$

onde a impedância específica é igual a impedância característica $\mathbf{z}_i = r_i$.

3.2.2 Atenuação do som

Através da análise completa dos fenômenos físicos que ocorrem na propagação de ondas acústicas, pode-se concluir que toda energia acústica transportada pela onda em algum momento será convertida em energia térmica [24]. Por outro lado, nas situações em que as ondas acústicas se propagam em meios finitos essa conversão pode ser considerada em termos de perdas de energia acústica. Essa dissipação ocorre através de diversos mecanismos de atenuação de som. No caso geral, essas perdas podem ocorrer por absorção e por espalhamento. Há diversos modelos que procuram quantificar esses mecanismos de maneira a se aproximar mais dos fenômenos que ocorrem em cada caso.

3.2.2.1 Absorção

Os modelos que consideram a atenuação por absorção separam tais mecanismos entre aqueles que ocorrem entre moléculas e em seus interiores. Historicamente considerava-se que as perdas estavam relacionadas preferencialmente à absorção térmica e viscosa entre as

partículas do meio. Posteriormente foram elaborados modelos que avaliam as perdas que dependiam da estrutura das moléculas. Quando há pouca dissipação, é comum analisar cada mecanismo separadamente e considerar a absorção total como sendo a somatória da contribuição de todos os mecanismos.

Como os mecanismos de absorção dependem da frequência, postula-se uma equação dinâmica através de uma velocidade do som complexa \mathbf{c} . O modelo clássico que quantifica essas perdas associa a absorção a um coeficiente de absorção clássico α que pode ser incluído na Eq. (3.5).

$$\nabla^2 \mathbf{p} + \mathbf{k}^2 \mathbf{p} = 0 \quad (3.23)$$

$$\mathbf{k} = k - j\alpha = w/\mathbf{c} \quad (3.24)$$

Prova-se através da Eq. (3.24) [24] que a velocidade de fase c_p está relacionada com a componente real de \mathbf{c} e que depende de k e α . A solução da Eq. (3.23) para uma onda plana propagando na direção $+x$ pode ser expressa da seguinte forma

$$\mathbf{p} = P_0 \exp^{-\alpha x} \exp^{j(\omega t - kx)} \quad (3.25)$$

onde P_0 representa a amplitude de pressão acústica da onda propagada em um ponto de referência.

Da Eq. (3.25), conclui-se que a amplitude decai de um fator $\exp^{-\alpha x}$ onde α representa o coeficiente de absorção espacial. Como c_p depende da frequência, a propagação é dita dispersiva.

3.3 Radiação e reflexão de um pistão plano circular

O pistão plano circular é considerado uma fonte de interesse prático e serve de modelo para inúmeras aplicações. Um desses modelos [25] considera um pistão de raio a montado em um defletor plano rígido de extensão infinita. Calcula-se o campo de pressão a frente do pistão a partir da resposta impulsiva em um meio fluido isotrópico sem perdas.

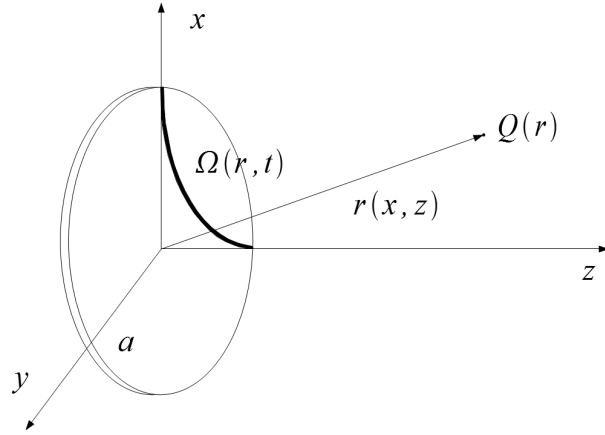


Figura 3.4: Modelo do pistão plano circular.

A equação que avalia o campo de pressão pode ser definida por:

$$\phi_i(r, t) = c \Omega(r, t) / 2\pi \quad (3.26)$$

$$P_i(r, t) = \rho \frac{\partial \phi_i}{\partial t} \quad (3.27)$$

$$P(r, t) = v(t) * P_i \quad (3.28)$$

onde:

$\phi_i(r, t)$ = resposta impulsiva do potencial de velocidade no ponto $Q(r)$;

$\Omega(r, t)$ = ângulo do arco equidistante inscrito na superfície do pistão;

$v(t)$ = movimento arbitrário da fonte;

A teoria pode ser estendida para considerar a reflexão de um refletor rígida no ponto Q da Fig. (3.4) utilizando o transdutor no modo de transmissão / recepção [26]. Para um transdutor na recepção, a tensão de saída devido a uma onda de pulsado emitido em um ponto é idêntico à onda de pressão nesse ponto resultante da transmissão do mesmo pulso pelo transdutor. Além disso, a voltagem de saída do transdutor pode ser considerada em função da pressão devido a resposta impulsiva no transdutor:

$$E_i = (ka/2)P_i \quad (3.29)$$

Primeiro, deve ser considerado uma fonte minúscula esférica em Q que tenha velocidade radial $v'(t)$. Essa velocidade pode ser considerada como sendo $v'(t) = -P/\rho c$, onde P é resultado do campo acústico no mesmo ponto Q, que é apenas uma aproximação

para ilustrar o processo. Portanto, a saída do transdutor recebendo um reflexão pontual é dada por:

$$E(t) = -(ka/2\rho c)v(t) * P_i(r, t) * P_i(r, t) \quad (3.30)$$

Dessa forma, podem ser feitas simulações para prever os resultados experimentais de acordo com a aproximação sugerida. Esses resultados serão utilizados apenas como comparação e não possuem relação direta com a magnitude dos valores obtidos nos ensaios com a bancada experimental.

3.4 Propriedades do óleo

As técnicas encontradas na literatura que são utilizadas para caracterização de líquidos por ultrassom são diversas e dependem principalmente das características específicas que serão determinadas. Para a aplicação atual, será necessária a determinação da velocidade de propagação, densidade e atenuação acústica da amostra de óleo. Essas propriedades podem ser obtidas através da técnica de múltiplas reflexões utilizando um transdutor duplo-elemento (TDE) [27]. Poder ser utilizada uma célula de medição que implementa essa técnica e o aparato experimental está representado no diagrama da Fig. (3.5).

A célula de medição é construída de forma a obter um sinal da onda transmitida e de três reflexões consecutivas. A construção da célula determina a sequência de interfaces entre o TDE / amostra e amostra / refletor que geram as reflexões avaliadas. A partir da Eq. (3.18) e da Eq. (3.13) pode-se obter a seguinte expressão:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 c_1}{c_2} \frac{1 + R_{12}}{1 - R_{12}} \quad (3.31)$$

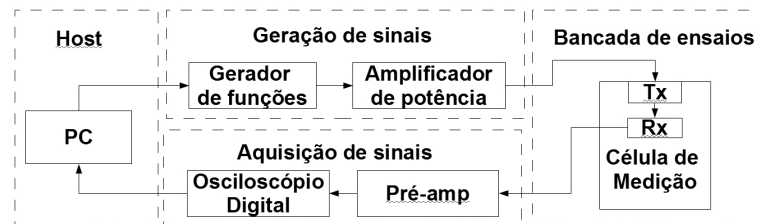


Figura 3.5: Diagrama de blocos do aparato experimental

Os valores de densidade da amostra de óleo devem ser comparados com os resultados obtidos nos ensaios por ultrassom para a verificação do método experimental

proposto.

Tabela 3.1: Características da amostra de óleo.

Características	Valores	Unidades
Densidade (60°F)	25,1	$^{\circ}API$
	0,9024	g/ml
Viscosidade (40°C)	24,62833	$mPa.s$
	27,82133	mm^2/s

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, é descrita a metodologia proposta para analisar os fenômenos acústicos que ocorrem na propagação de ondas acústicas em meios heterogêneos contendo misturas de sólidos em líquidos.

Os métodos apresentados no trabalho de Thorne[28], que descreve um método de medição do espalhamento acústico em suspensões serviram de base na elaboração dos procedimentos.

A Descrição da dimensão das partículas , as partículas que estão sendo analisadas devem ser caracterizadas quanto a sua PSD, ou pelo menos obter a faixa de dimensão com maior probabilidade de se encontrar as partículas.

B Arranjo experimental, deve ser descrito o arranjo experimental utilizado para realização dos ensaios, incluindo tanque de medição, célula de medição, transdutores de ultrassom, equipamentos de aquisição e procedimentos dos ensaios.

C Obtenção dos parâmetros acústicos, de acordo com o trabalho de Thorne[28] a média quadrática da tensão elétrica obtida por um equipamento ABS, V_{rms} , adquirido através de múltiplos espalhamentos esféricos com distribuição arbitrária de tamanho de partículas a uma distância r é dado por:

$$V_{rms}(r) = \frac{K_t K_s M^{1/2}}{r \psi(r)} \exp^{-2r(\alpha_w + \alpha_s)} \quad (4.1)$$

Com,

$$K_s = \left(\frac{f_0^2}{a_0 \rho} \right)^{1/2} \quad (4.2)$$

$$\alpha_s = \frac{3M\chi_0}{4a_0\rho} \quad (4.3)$$

onde:

K_t : constante calibrada que inclui parâmetros do transdutor e do sistema eletrônico,

ψ : relacionado com correções do campo acústico do transdutor,

a_0 e ρ : tamanho médio e densidade das partículas, respectivamente,

f_0 e χ_0 : função de forma e a secção transversal de espalhamento, dependem de ka_0 ,

α_W : coeficiente de absorção da água,

M : relacionado com a concentração em massa das partículas da mistura;

No presente trabalho somente será analisada a relação existente entre a tensão elétrica e a concentração em massa das partículas. Dessa forma, pode-se considerar que seja razoável encontrar uma relação do tipo:

$$V_{rms}^2 = KM \quad (4.4)$$

onde K representa um coeficiente empírico, para uma determinada sequência de ensaios mantidos constantes os outros parâmetros descritos a cima.

Portanto, optou-se por utilizar uma abordagem empírica para o problema de determinação do teor de partículas em misturas precedido por uma análise estatística dos dados coletados sendo comparada com algum método convencional, como separação e inspeção.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Inicialmente, é necessário esclarecer que o autor deste trabalho entende por tanque de testes somente a estrutura utilizada para armazenar as amostras que serão ensaiadas, incluindo adaptadores necessários para a montagem de uma célula de medição. E por célula de medição todo o sistema resultado da integração e montagem de transdutores de ultrassom em estruturas que armazenam amostras, como por exemplo, o tanque de testes. O conceito de bancada de testes pode ser entendido como sendo a montagem de uma célula de medição com diversos equipamentos auxiliares, como sistema de aquisição, dispositivo dosador, microcomputadores, etc.

Os resultados expostos neste capítulo são apenas parciais e não necessariamente possuem relação direta com os objetivos específicos apresentados na subsecção 1.2.

5.1 Desenvolvimento do tanque de testes

5.1.1 Formato e materiais

O tanque de testes deve ser desenvolvido para fins de ensaios não destrutivos, comportar um vão suficientemente grande e comprido para servir de câmara de medição, ser portátil por se tratar de um equipamento de ensaios preliminares, permitir uma visualização externa pelo operador e suportar excessivos trocas de água em razão dos eventuais esvaziamentos.

Para tanto, optou-se pelo formato verticalizado que pudesse admitir um escoamento supostamente contínuo de partículas de areia ao longo de toda sua extensão. Uma abertura superior serviria de entrada da amostra e um compartimento inferior para armazenar uma quantidade de areia depositada - resultado de sucessivos ensaios. Um orifício na meia altura do tanque posicionaria o transdutor na horizontal para efetuar pulsos transientes na direção perpendicular ao escoamento.

Além disso, era necessário que sua montagem consistisse basicamente de um casco e de um fundo, pois estes deveriam ser de materiais diferentes e permitirem sua futura desmontagem caso coubesse outras possíveis configurações se fosse necessário.

Os materiais envolvidos deveriam acatar as propriedades anteriormente descritas. A visualização externa foi resolvida utilizando o material acrílico no casco do tanque por possuir relativa transparência. O acrílico é um material de fácil moldagem, o que fez permitir fabricar o casco em uma peça única, a menos do seu fundo que foi colado à mesma. As propriedades acústicas do acrílico são favoráveis para este ensaio em água, porque ambos possuem impedâncias acústicas relativamente próximas tendo como consequência um baixo coeficiente de reflexão. Porém, as paredes distarem o suficiente do campo de atuação do transdutor utilizado e, portanto, não influenciarem nos sinais retornados ao transdutor.

Para o fundo foi dada preferência a um material metálico de fácil usinagem, foi escolhido o alumínio, sendo assim facilmente feita uma alteração no projeto. Outras possíveis configurações no método poderiam ser arriscadas deste modo assim como, do modo pulso-eco para o modo emissor e receptor. Muito embora o alumínio apresente um coeficiente de intensidade de reflexão muito alto em relação à água. Porém, como o sinal de interesse é devido ao retroespalhamento não há interferência na sua reflexão. Por último, o material do adaptador para fixar o transdutor no casco de acrílico precisava ter baixa elasticidade e de fácil usinagem. Foi decidido usar Nylon porque atendia as especificações do adaptador. Sua geometria deveria permitir a inclusão de O’rings¹ com o intuito de vedar o orifício do casco.

Tabela 5.1: Impedância acústica dos materiais utilizados.

Material	Impedância acústica específica ($Pa \cdot s/m$) $\times 10^6$
Água ²	1.48
Alumínio	17.0
Acrílico	3.26

A partir das Eq. (3.18)Eq. (3.17), coeficiente de reflexão e de transmissão, respectivamente, e dos valores ilustrados na Tab. (5.1) pode-se chegar aos resultados apresentados na Tab. (5.2), que indicam as frações de intensidade acústica da onda refletida e transmitida

¹Um O’Ring é um objeto toroidal, geralmente feito de elastômero, embora alguns materiais tais como plástico e metais sejam algumas vezes utilizados. A vedação com O’Ring é um meio de fechar a passagem e prevenir uma indesejável perda ou transferência de fluido.

Tabela 5.2: Coeficientes de Reflexão e Transmissão.

Interface	R	T
Água - Alumínio	0.8398	1.8398
Água - Acrílico	0.3755	1.3755

A avaliação desses resultados conclui que a interface água-alumínio pode ser considerada como uma superfície refletora e a interface água-acrílico como não refletora.

5.1.2 Projeto

O projeto do tanque foi concebido com auxílio de ambiente gráfico com uso do programa Autodesk® Inventor Professional 2009 - Student Version. Este programa facilitou a geração e modificação do modelo sólido, pois sua versão para estudante pode ser encontrada no próprio site do Autodesk®. A Fig. (5.1) ilustra um exemplo de modelo gerado a partir desse ambiente gráfico.

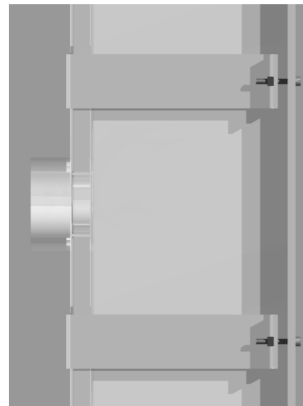


Figura 5.1: Modelo do tanque em detalhe

As dimensões do casco e do fundo foram escolhidas considerando o tamanho final do tanque e os materiais encontrados no almoxarifado, o desenho técnico do fundo pode ser encontrada na Fig. (A.2). A portabilidade foi atendida restringindo a maior dimensão para algo em torno de 1000 mm. As chapas de alumínio de espessuras de 2 a 5 mm poderiam ser encontrada no almoxarifado do laboratório. O casco teria suas dimensões limitadas pelo fabricante de peças em acrílico Plasxiglas. Porém este não foi um problema, pois o desenho enviado pôde ser encaminhado para a sua fabricação sem restrição nenhuma.

O perfil do adaptador foi dimensionado a partir do tamanho dos transdutores, que foram retiradas do catálogo da Parametrics® (920-041D-EN) [29], e do dimensionamento

dos canais de alojamento dos O’rings encontrados no catálogo da Parker® (001-5 BR)[30]. A Fig. (5.2) ilustra o resultado da modelagem do adaptador indicando o posicionamento dos O’rings e do transdutor e a Fig. (A.3) o mostra o seu respectivo desenho técnico. Foram criados modelos simplificados dos transdutores e dos O’rings para exemplificar a montagem do tanque. Muito embora esses últimos não seriam fabricados ao contrário de todo o resto do tanque.

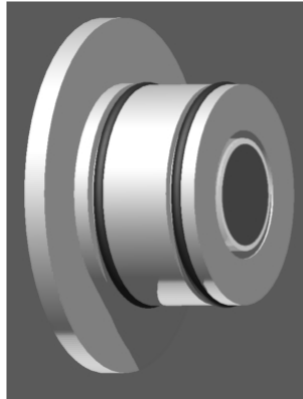


Figura 5.2: Modelo do adaptador com um transdutor inserido

Parafusos e porcas utilizadas foram também desenhados no ambiente do Inventor. Suas dimensões foram retiradas das normas ISO 1207[31] (parafuso M4X20) e ISO 4032[32] (porca hexagonal M4), respectivamente. Todos os detalhes das restrições de montagem do tanque foram definidos no modelo sólido em ambiente de montagem - Assembly. Essas diretrizes foram essenciais para eliminar eventuais dificuldades de montagens. Somente a vedação em Sikaflex® não foi modelada em CAD, pois não havia necessidade para fins de fabricação.

5.1.3 Protótipo

Como exposto acima, a maior parte do tanque foi fabricado e as Fig. (B.1) e Fig. (B.3) mostram fotos de seus detalhes. Sendo que se optou por aproveitar o material encontrado no almoxarifado do Laboratório de Ultrassom. A exceção a esta meta foi o casco de acrílico, porque não poderia ser fabricado na geometria especificada a partir das máquinas das oficinas do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos (PMR).

A primeira peça a ser fabricada foi o casco, pois esta poderia apresentar desvios de tolerância. O desenho técnico foi enviado à empresa Plasxiglas e então fabricada como fora especificado. Porém, como em uma de suas partes foi feita uma dobra em uma chapa de acrílico, as dimensões requeridas não foram alcançadas e a tolerância de paralelismo

não foi atingida. No entanto, o casco pôde ser unido ao fundo, conforme a montagem idealizada, pois o material adesivo e de vedação também serviu como preenchimento do espaço entre as duas peças.

Posteriormente, iniciou-se o processo de fabricação do fundo. Uma chapa de alumínio de 3 mm foi riscada na extensão do seu comprimento utilizando uma mesa de granito e uma riscadora de precisão da Mitutoyo®. Em seguida, a chapa foi guilhotinada e limada para retirar as rebarbas resultantes. Com o auxílio de outra mesa, foi adicionado riscos às suas extremidades a fim de indicar os locais de furação. Logo após, uma pequena endentação na região de cruzamento dos riscos foi feita utilizando-se um martelo e um punção. Estes últimos serviram de guia para a broca no início da usinagem de cada furo. Por fim, uma broca de aço rápido de 4.2 mm foi empregada para efetuar os furos passantes.

O próximo passo seria, então, a fabricação das alças. Estas alças serviriam para a melhor fixação do fundo no casco, pois a união somente feita com o adesivo não resistiria a eventuais choques mecânicos e a tensões de pressão hidrostática devido à coluna d'água formada no interior do tanque. Seis alças foram fabricadas a partir de pequenas chapas de alumínio de 2 mm de espessura, seu desenho técnico pode ser encontrado na figura Fig. (A.1). Foi utilizada novamente a mesa de granito e a riscadora para definir tanto o limite das chapas como as linhas de dobra e a posição dos furos.

Repetiu-se o procedimento de furação com as mesmas ferramentas utilizadas na fabricação do fundo. Os riscos das dobras tiveram uma compensação dos raios de arredondamento. E foram feitas as dobras através de uma dobradeira manual.

A peça seguinte a ser fabricada foi o adaptador. Desenhado para ser fixado no orifício intermediário de 50 mm do tanque e também para comportar um transdutor ultrassônico de diâmetro nominal de 1 *in* (25.4 *mm*), o adaptador deveria ter suas dimensões bastante precisas. Nenhuma tolerância de concentricidade foi admitida, porém, uma tolerância dimensional exigia um desvio simétrico máximo de 0.05 *mm*, tanto no diâmetro como na largura dos alojamentos dos O'rings. Por este fato, tornou-se necessária a mão de obra de um técnico do laboratório para a operação do torno mecânico. Operações como: furação, faceamento, sagração e etc, foram realizadas em um tarugo de Nylon de 80 *mm* de diâmetro.

Após a fabricação das peças listadas acima, os parafusos, porcas e O'rings foram comprados em uma quantidade 50% acima do necessário para a montagem do tanque. Assim, prevendo possíveis defeitos, garantiria a substituição de elementos não conformes.

A montagem consistiu de duas etapas. A primeira diz respeito à montagem do tanque, que inclui a fixação do casco ao fundo por elementos rosqueados e adesivos. As alças foram inseridas no casco, pois estas já possuíam um ajuste forçado leve, e unidas ao fundo através dos parafusos M4X20 e das roscas hexagonais. Em seguida, uma após a outra, retiraram-se as alças para a aplicação do adesivo Sikaflex® na junção do acrílico com o alumínio. Esperou-se que o adesivo curasse e então foram realizados os primeiros testes com imersão em água.

A etapa posterior trata-se de uma etapa rotineira feita toda vez que o transdutor precisar ser trocado. Esta etapa resume-se a inserção do transdutor no adaptador com a vedação interna feita através dos O’rings internos (Nº Parker 2-022), sendo ilustrada no esquema da Fig. (5.3). Em seguida, a inserção do adaptador no tanque com a vedação externa feita através dos O’rings externos (Nº Parker 2-133), sendo ilustrada no esquema da Fig. (5.4).

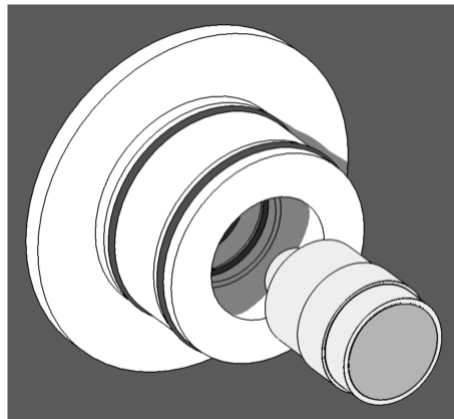


Figura 5.3: Esquema de montagem do transdutor no adaptador

Esta montagem garante que o transdutor não escape pelo orifício interno do adaptador. Por esse mesmo motivo o transdutor se mantém fixo ao adaptador pela pressão interna da câmara de medição. A Fig. (B.2) mostra uma foto da montagem do transdutor no adaptador.

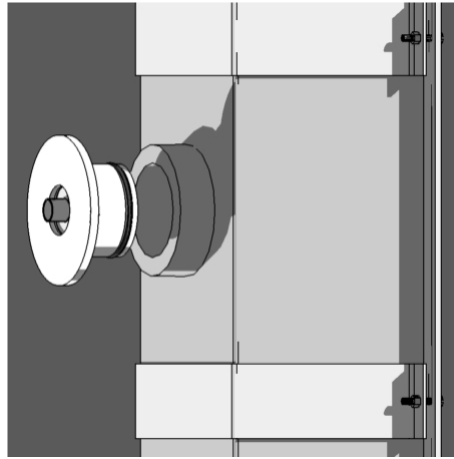


Figura 5.4: Esquema de montagem do adaptador no tanque

5.2 Ensaios com amostras padronizadas de areia

A fim de visualizar melhor a correlação estudada, foram realizados ensaios com quantidades padronizadas de areia, entre 10 e 100 *mg*, e houve confirmação da correlação idealizada,. Foi possível verificar também que a correlação pode ser estabelecida utilizando diferentes transdutores ultrassônicos de banda-larga com frequências centrais de 5 a 10 MHz para partículas de areia com grãos da ordem de 100 a 500 μm .

5.2.1 Preparação das amostras e procedimentos de ensaios

O modelo de transdutor escolhido foi o de imersão com diâmetro grande. Esses transdutores possuem uma camada de acoplamento ³ com a espessura de $\frac{1}{4}$ de onda quando imerso em água para facilitar a transmissão do pulso ultrassônico. Eles possuem diâmetros grande para aumentar o comprimento do campo próximo, aumentando assim o alcance do seu foco. O perfil do campo acústico gerado por um pulso elétrico transiente é bastante colimado e pouco divergente, melhorando a qualidade do END requerido. Foram selecionado transdutores de frequência de ressonância de 1.0 MHz até 10 MHz ⁴.

A partir de alguns testes em um tanque comum e da teoria de espalhamento acústico pôde-se perceber que o fenômeno era mais ou menos apreciado dependendo da frequência e do tamanho das partículas.

As amostras de areia foram retiradas arbitrariamente de diversos lugares e, por-

³Tradução do termo em inglês *matching*

⁴Os modelos correspondentes são: V314-SU (1.0 MHz), V305-SU (2.25 MHz), V381-SU (3.5 MHz), V308-SU (5.0 MHz) e V315-SU (10 MHz)

tanto, desconhecia-se a granulometria das mesmas. O método utilizado de separação quanto o tamanho dos grãos baseou-se no peneiramento. Porém, antes mesmo desta preparação, como a areia encontrava-se com muita umidade, que dificultaria o seu manuseio e o controle de sua concentração, uma quantidade foi posta à secagem em um forno industrial por um período não especificado.

Algumas amostras de areia com granulometria diferentes foram separadas facilitando o encaminhamento dos ensaios, seguido de pesagem e separação em porções de 10 a 100 mg. Foi utilizada uma balança semi-analítica da Marte® modelo UX 420H.

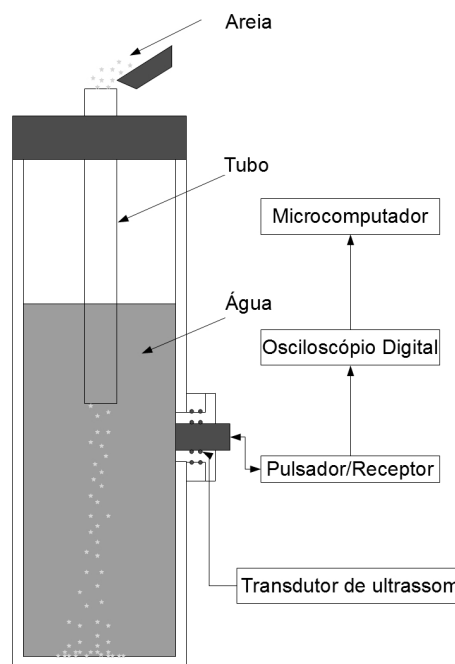


Figura 5.5: Desenho esquemático da célula de detecção de areia na bancada de testes

A célula de medição utilizada possui água em repouso e as partículas de areia são lançadas num duto de 28 mm de diâmetro cujo eixo de simetria axial intercepta o eixo de simetria axial do transdutor que está perpendicular ao eixo do tubo, como mostrado na Fig. (5.5) e na foto ilustrada na Fig. (B.4).

O transdutor de ultra-som é excitado com um pulso estreito por um equipamento pulso-eco da Panametrics NDT® modelo 5077PR *Squarewave Pulser/Receiver*. A partir da excitação, uma onda de ultra-som é gerada e propaga-se na água que contém partículas de areia caindo pelo efeito da gravidade. As partículas de areia são dosadas manualmente no topo da célula e descem por um tubo de 28 mm de diâmetro. Ao passar na zona iluminada pelo transdutor de ultra-som é atingida pela onda acústica e gera espalhamento dessa onda sendo que a parte retro-espalhada retorna ao transdutor de ultrassom que

capta esse sinal. O sinal é amplificado entre 40 e 60 dB e é adquirido por um osciloscópio digital da Agilent Technologies® modelo DSO5012A. O osciloscópio é conectado a um microcomputador por uma interface ethernet. O sinal adquirido através do modo a-scan ⁵ tem a forma do sinal mostrado na Fig. (5.6) sendo armazenado para posterior processamento.

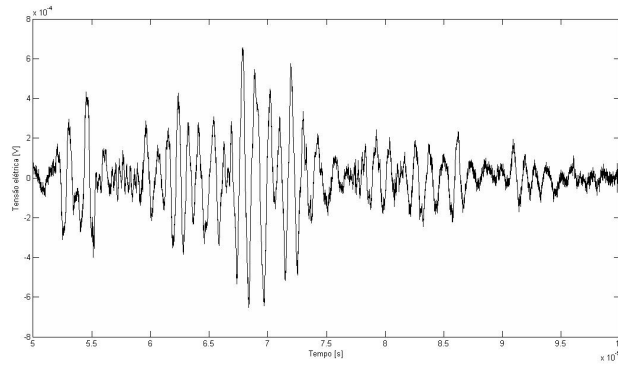


Figura 5.6: Exemplo de sinal adquirido através do retro-espalhamento

As partículas de areia utilizadas nos experimentos têm uma granulação variável sendo que as maiores partículas são da ordem de 500 μm . A Fig. (5.7) mostra a fotografia de grãos de areia obtida por um microscópio óptico. Há um fio de aço inoxidável com diâmetro de 150 μm para referência.

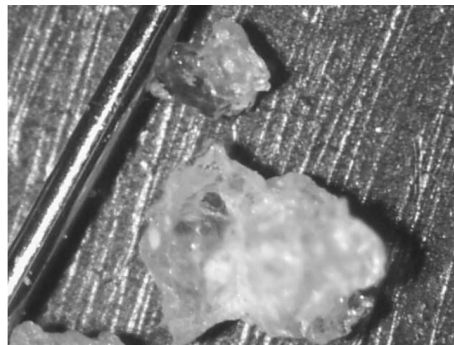


Figura 5.7: Fotografia de grãos de areia utilizados nos experimentos

Para calcular a concentração de areia, mediu-se a velocidade média das partículas de areia passando pelo transdutor de ultrassom e determinou-se que essa velocidade é de aproximadamente 50 mm/s . Considerando que as partículas estão distribuídas no interior do tubo com 28 mm de diâmetro e caem com 50 mm/s de velocidade, tem-se que para

⁵A-Scan é um método de apresentação de dados no qual se faz uma digitalização da modulação de amplitude do sinal. Como geralmente aplicada a pulso eco ultra-som, o eixo horizontal e vertical são proporcionais ao tempo ou a distância e uma amplitude ou magnitude, respectivamente.

uma amostra de 10 mg de areia que cai em aproximadamente 5 s, uma concentração em volume de aprox. 50 ppm. Nesse cálculo foi considerado que a densidade da areia é igual a 1,6 g/cm³.

5.2.2 Resultados e análise

A quantidade de areia foi correlacionada à energia dos sinais retro-espalhados durante a passagem de areia pelo transdutor. A energia acústica de cada imagem foi obtida pela integração, no tempo, do quadrado da amplitude do sinal conforme a Eq. (3.10). A energia total foi obtida pela soma da energia de 100 imagens obtidas a partir de uma série temporal de período de aproximadamente de 40 s. A Fig. (5.9) mostra gráficos referentes a alguns exemplos desses ensaios e estão separados por quantidades iniciais que variam entre 10 e 100 mg.

A Fig. (5.8)⁶ mostra os resultados da energia acústica retro-espalhada para transdutores com frequências de 10 MHz. A linha tracejada representa uma curva ajustada por interpolação linear ($f(x) = ax + b$) e o desvio padrão foi obtido a partir de uma população de 8 amostras para cada quantidade inicial.

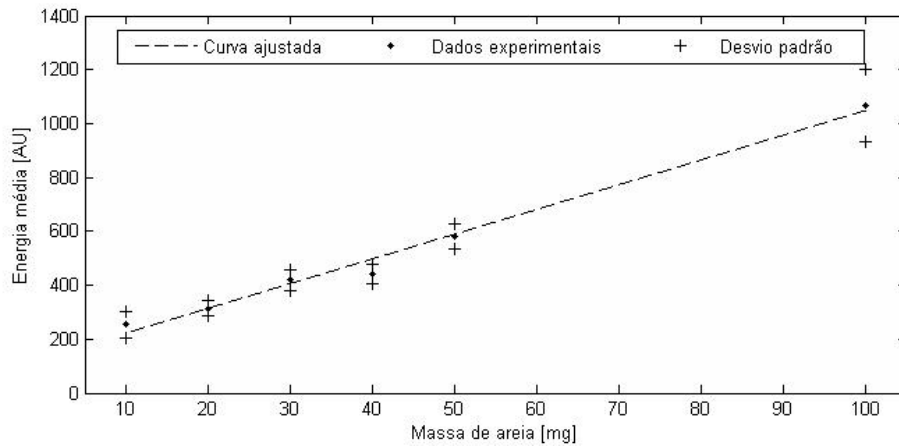


Figura 5.8: Energia acústica retroespalhada medida com o transdutor de 10 MHz

Os gráficos da Fig. (5.8) mostram uma boa correlação entre a concentração de areia e a energia ultrassônica medida. De acordo com a metodologia descrita no capítulo 4 essa correlação era esperada e pode ser descrita segundo um coeficiente empírico, E , da Eq. (4.4). A partir dos resultados da Tab. (5.3) é mostrado que o coeficiente E se assemelha ao coeficiente angular a da interpolação e que o coeficiente linear b representa

⁶As amostras são : (a) 10 mg, (b) 20 mg, (c) 30 mg, (d) 40 mg, (e) 100mg

um ruído de fundo característico da célula de medição.

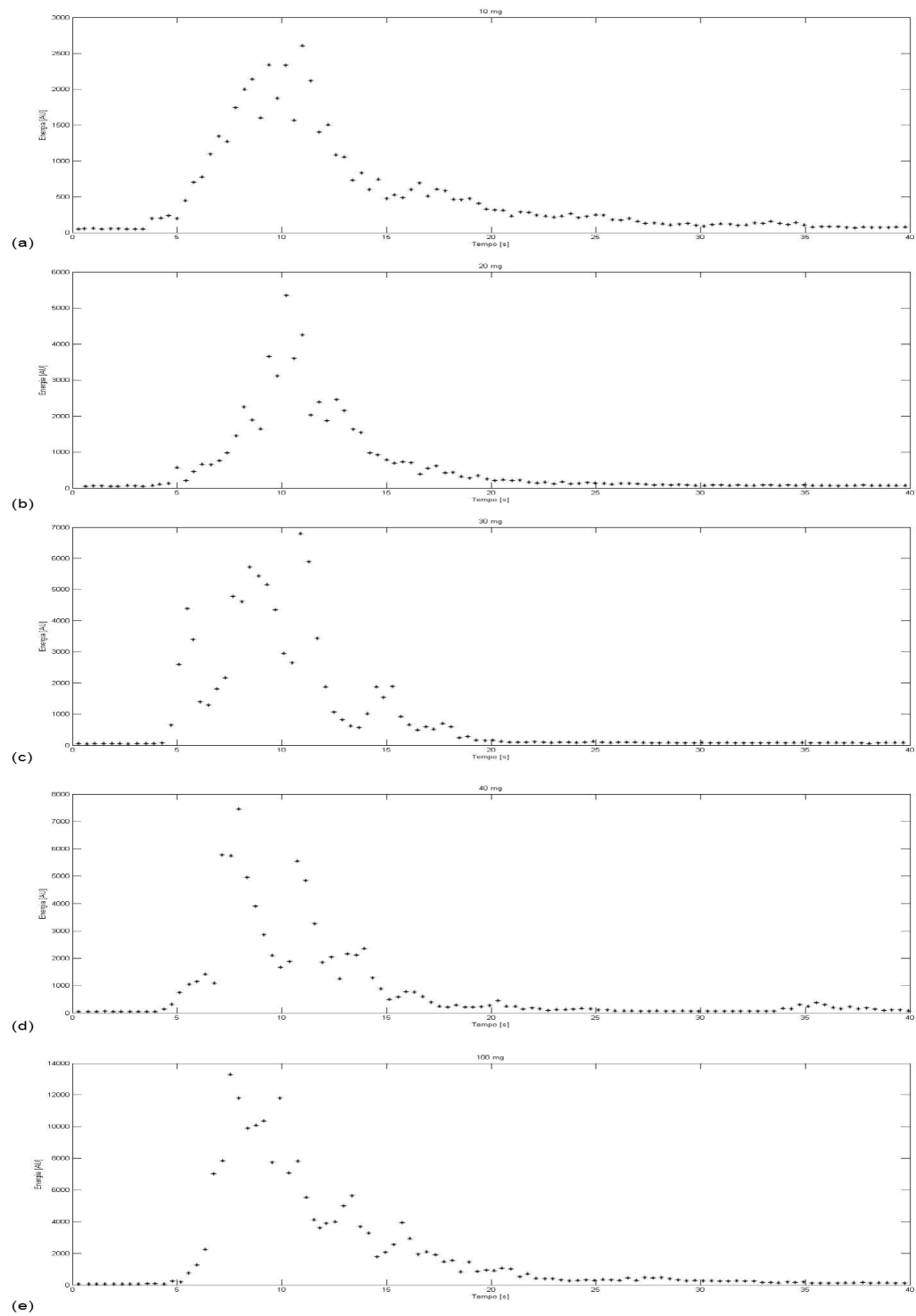


Figura 5.9: Série temporal correspondente a análise da energia acústica retroespalhada das sequências de ensaios

Tabela 5.3: Ensaios preliminares - Coeficientes da curva ajustada.

Coeficientes	Valor médio	Intervalo de confiança (95%)
a	9.18	[7.83 10.53]
b	130.4	[61.65 199.2]

Dessa forma, obtêm-se uma equação modificada que estabelece a relação a cima desenvolvida:

$$\begin{aligned}
 V_{rms}^2 &= a * M + b \\
 V_{rms}^2 &= 9.18 * M + 130.4
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Considerando a aplicação em petróleo que apresenta elevada atenuação acústica certamente há que se explorar o uso de frequências menores que apresentam menores atenuações. Serão feitos testes adicionais com transdutor de 1 MHz para verificar a sensibilidade na detecção de areia.

5.3 Simulações dos fenômenos acústicos

Os resultados obtidos através da avaliação experimental do sistema implementado sugere que seja feita uma avaliação computacional para que seja possível fazer uma comparação. De acordo com a referida aproximação teórica (Sec.3.3) dos fenômenos acústicos relacionados à propagação de ondas em meio fluido, foi elaborada uma rotina no programa MATLAB[®] que analisa as características do fenômeno de retro-espalhamento.

Esta rotina tem como principais enfoques a utilização de algoritmos de geração de parâmetros aleatórios que simulem o posicionamento das partículas no meio e análise dos parâmetros acústicos conforme estabelecido na metodologia apresentada anteriormente no capítulo 4. Com base nesses requisitos foi feita uma série de pressupostos de maneira a estabelecer um modelo simplificado de forma a obter resultados comparáveis aos experimentais, ou seja, que, no mínimo explicita a correlação entre os parâmetros acústicos e a concentração de partículas nessas misturas. Os pressupostos do modelo computacional são:

- A radiação de um pistão plano circular possui simetria axial e, portanto, os resultados adquiridos em um determinado plano diametral que intercepta o eixo acústico

central do transdutor podem ser extrapolados aos infinitos planos que compõem a região de ensaio adotada;

- O preenchimento da região de ensaio por partículas de dimensões normalmente distribuídas é limitado pela relação de volume definida no início de cada iteração simulando o valor de referência utilizado nos ensaios com o dosador automático de partículas;
- A contribuição do fenômeno do retro-espalhamento que ocorre em cada partícula a obtenção dos resultados computacionais possui caráter desprezível na medida em que sua simplificação ao fenômeno de reflexão é suficiente para estabelecer a correlação desejada ;

Portanto, a região de ensaio, a frequência central e diâmetro do transdutor, a frequência de amostragem dos sinais, a quantidade de amostras e a sequência de frações em volume e a distribuição da dimensão das partículas fazem parte dos parâmetros de entrada estabelecido pelo programa. Um diagrama de blocos apresentando o algoritmo utilizado na rotina de simulação pode ser encontrado na Fig. (5.13)

5.3.1 Resultados e análises

A partir do programa de simulação foram obtidos resultados que possuem algumas características dos ensaios experimentais. Foi simulado um a-scan de uma amostra com distribuição uniforme de partículas espalhadas em um espaço amostral idêntico ao experimental e obteve-se um gráfico ilustrado na Fig. (5.10) que possui o mesmo aspecto do apresentado na Fig. (5.6). Além disso, realizou-se a simulação da série temporal encontrada na Fig. (5.26) em termos de energia média de cada a-scan gerado a partir de um sequência de iterações caracterizando um ensaio com fração de 400ppm de partículas em meio líquido. Esse resultado possui a característica de distribuição presente nos ensaios experimentais e pode ser visualizado no gráfico da Fig. (5.11)

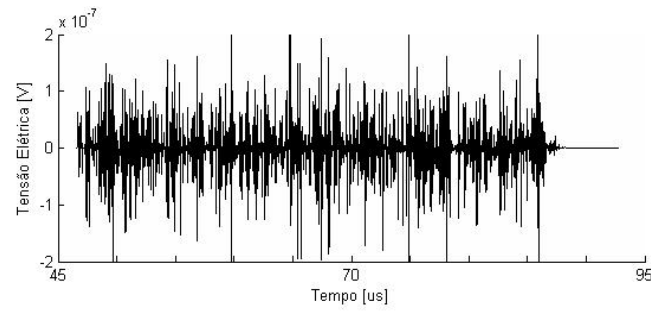


Figura 5.10: Exemplo de sinal simulado através do retro-espalhamento

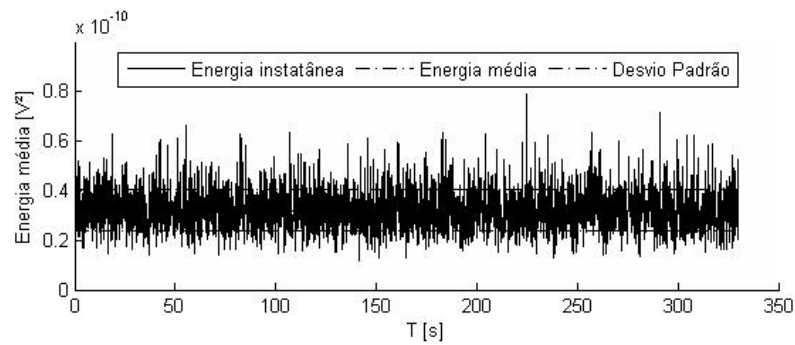


Figura 5.11: Exemplo de série temporal simulada da energia média de cada a-scan durante um período de ensaio

Os resultados ilustrados são úteis para mostrar que o algoritmo utilizado simula bem os mecanismos de superposição de diversas reflexões e a estatística de cada ensaio considerando a distribuição uniforme de partículas com destaque para a energia média e desvio padrão. O resultado que falta ser apresentado é o da correlação entre a energia média e a concentração de partículas. De acordo com a Fig. (5.13), após ter sido feito a análise estatística de cada ensaio em sequência, o programa faz um cálculo e análise da correlação. Este resultado reproduz bem relação linear obtido entre a energia acústica retro-espalhada e o teor de partículas através dos ensaios com areia em batelada. Além disso, a curva ajustada possui um coeficiente de correlação próximo de 1, indicando que os resultados simulados representam melhor a relação obtida nos ensaios experimentais.

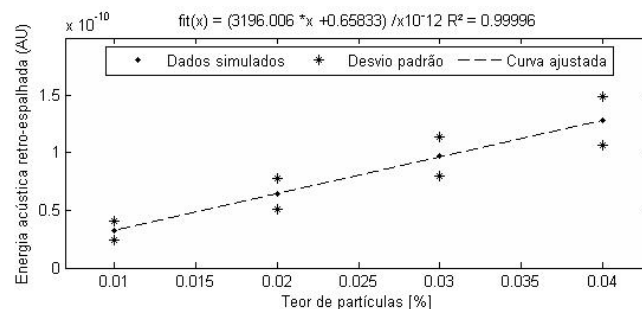


Figura 5.12: Energia acústica retroespalhada do ensaio usando o programa de simulação

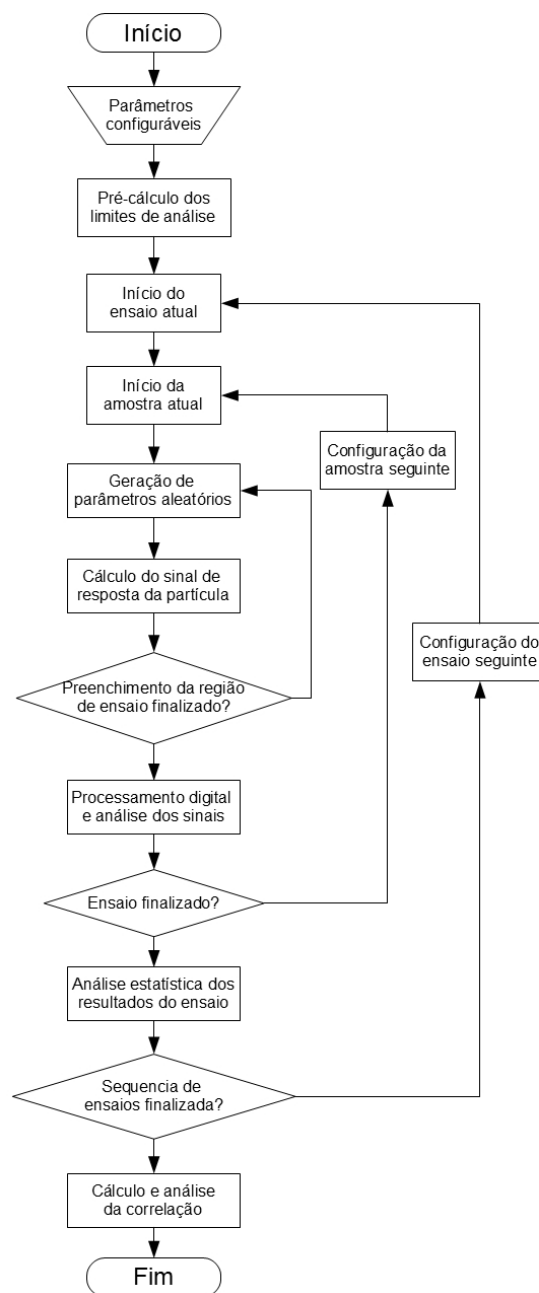


Figura 5.13: Diagrama de blocos da rotina de simulação

5.4 Dosador automático

Depois de realizar os ensaios com amostras padronizadas de areia foi projetado um protótipo de um dispositivo de controle de concentração de partículas. Este dispositivo é montado em uma estrutura vertical com perfil quadrado na qual são fixados os mecanismos de atuação.

Um dos mecanismos é o alimentador que consiste de um atuador linear acionado por um motor de passo, um pistão que armazena as partículas a serem ensaiadas e um êmbolo que empurra continuamente uma quantidade determinada de partículas para fora desse tubo. Essas partículas são então raspadas por um mecanismo rotativo, disposto acima do terminal de saída do alimentador, que possui uma engrenagem com quatro filetes acoplada a outro motor de passo. A esta engrenagem são fixadas superfícies raspadoras que direcionam o fluxo de partículas para um funil externo que as despeja para o tanque da célula de medição.

5.4.1 Projeto do dosador automático

As exigências de projeto do dispositivo foram enumeradas e o projeto mecânico foi realizado pelo técnico mecânico do Laboratório de Ultrassom (Wellington Ramos).

As peças foram fabricadas na oficina do próprio departamento e foram utilizados os materiais: alumínio, aço inox, latão e nylon. Foi utilizado um atuador linear da THK® modelo KR2606 (500-5E0) [33], que possui passo de 2 mm, e um motor de passo da Kalatec® modelo KTC-HT23-394 [34](1 stack) para compor o mecanismo alimentador. Para o mecanismo raspador foi utilizado um motor de passo modelo KTC-HT23-397 (2 stacks).

O mecanismo alimentador possui uma peça feita de chapa de alumínio que é fixada por quatro parafusos ao atuador linear em uma extremidade. Um cilindro de latão, cujas extremidades são rosqueadas, é montado no interior do tubo de aço inox e fixado à outra extremidade da chapa de alumínio. A outra extremidade desse cilindro é fixada um êmbolo de nylon, que foi desenhado para servir de guia no interior do tubo e evitar que as partículas não escapem pela abertura inferior do tubo. A foto do mecanismo alimentador encontra-se em anexo e ilustrada na Fig. (B.5).

O mecanismo raspador possui uma engrenagem de alumínio com quatro filetes cujas faces laterais são paralelas à direção do eixo do alimentador. Essa engrenagem é

fixada ao eixo do motor de passo e está pré-tensionada por uma mola que fica entre sua extremidade superior e o flange do motor. São fixadas folhas flexíveis de um material polimérico transparente a essas faces que são usadas para raspar as partículas na direção do funil fabricado em alumínio. A foto do mecanismo raspador encontra-se em anexo e ilustrada na Fig. (B.6).

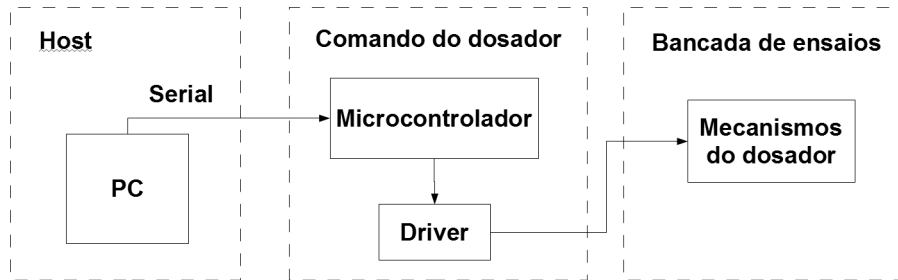


Figura 5.14: Modelo de acionamento dos motores de passo

O acionamento dos motores de passo é feito, conforme o esquema da Fig. (5.14), utilizando um microcontrolador JackRabbit BL1800 da Z-World, que possui um micro-precossador Rabbit 2000®, e drivers de motor de passo G203V drive da Geckodrive's. O microcontrolador é programado em linguagem C e utiliza o sistema de desenvolvimento integrado Dynamic C. A Fig. (B.7) ilustra a placa de desenvolvimento utilizada para programa e executar as funções do microcontrolador e na foto da Fig. (B.8) mostra os detalhes dos driver's que acionam os motores de passo.

5.4.2 Implementação

Durante a fabricação e montagem do dispositivo dosador feita pelo técnico, foi iniciado o processo de programação do microcontrolador. A rotina de software implementada possui 3 co-estados: comunicação, interpretação e configuração. A comunicação é realizada utilizando protocolo RS-232 com a saída da porta serial do PC. A interpretação é baseada em palavras codificadas que indicam o modo de operação dos motores de passo. A configuração está relacionada à interrupção do microprocessador que realiza operações em Assembly que realiza os pulsos de saída para os drivers.

Testes foram realizados com diferentes velocidades de raspagem e foi determinada uma velocidade típica que resultasse em um fluxo de partículas considerado praticamente constante. A frequência do motor do raspador correspondente a essa velocidade é de, $f_r = 1Hz$.

Para impor um fluxo constante da amostra com uma taxa em volume por segundo determinada pode-se trabalhar com os conceitos de vazão Q_v , em mm^3/s , passo, p , do atuador linear do alimentador, área interna, A_{in} , do tubo do alimentador e f_{pa} , frequência dos pulsos enviados ao driver. Considerando que o driver pode ser configurado para trabalhar com 10-*Microstep* e que os motores de passo possuem *step* de 1.8° (200 passos por volta). Pode-se chegar na seguinte relação:

$$f_{pa} = 2000 \cdot \frac{Q_v}{pA_{in}} \quad (5.2)$$

onde:

$$p = 2mm;$$

$$A_{in} = 452,39mm^2.$$

$$f_{pa}(Q_v) = kQ_v \quad (5.3)$$

onde:

$$k \approx 2,21$$

Da mesma forma que foram feitos testes para determinar uma velocidade típica do raspador, determinou-se uma vazão típica para o alimentador de $Q_v^t = 12mm^3/s$. Podemos obter assim a frequência de saída dos pulsos do microcontrolador necessária para acionar os motores a suas velocidades típicas mostrada na Tab. (5.4).

Tabela 5.4: Acionamento dos motores de passo.

Motor	Frequência (Hz)	
	motores	pulsos
Raspador	1	2000
Alimentador	0,013	26,53

A partir desses dados, determinou-se os parâmetros necessários para a configuração dos contadores que acionam as rotinas de interrupção e envia pulsos com frequência controlada. Nesse sentido, foi colocado um ponta de prova de um osciloscópio digital no pino de saída dos pulsos direcionados ao driver do motor, conforme o esquema da Fig. (5.15). L levantou-se uma curva que relaciona o parâmetro de entrada (comando numérico) com a frequência dos pulsos de saída do microcontrolador.

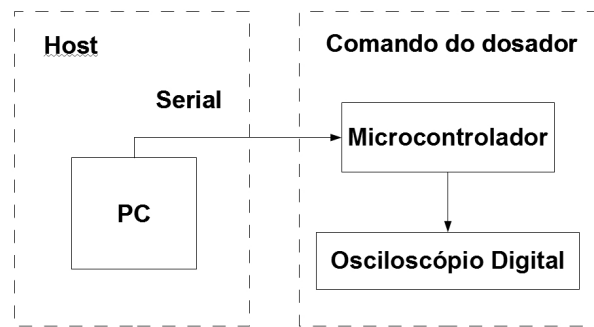


Figura 5.15: Esquema de montagem para calibração do comando do dosador

A Fig. (5.16) ilustra esta curva ajustada de forma a verificar a linearidade atingida do controle de pulsos e a diferença entre as regiões de maior e menor precisão de ajuste de acordo com maiores e menores frequências, respectivamente. A idéia básica desse comando numérico é definir a palavra de comando como um conjunto de caracteres ASCII limitados de "000" a "999" para percorrer o intervalo de frequência determinado pela análise dos mecanismos do dispositivo. Além disso, foi utilizado juntamente a esse comando um ajuste configurável que funciona como um multiplicador do período entre pulsos e tem por objetivo permitir um ajuste mais preciso da frequência de saída. Porém, este comando, denominado fracionamento, será pouco utilizado somente em casos especiais.

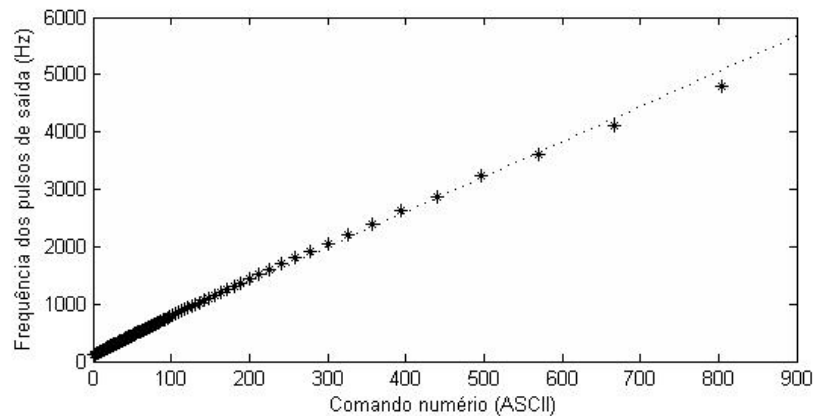


Figura 5.16: Curva experimental ajustada de frequência de saída de pulsos

Para obter diferentes frações de partículas as frequências dos pulsos de saída para o alimentador devem ser alteradas conforme a necessidade. Assim, pode ser estabelecida uma função que relaciona a frequência de pulsos com a fração de partículas sólidas e que será definida nas etapas posteriores deste trabalho.

5.4.3 Calibração

Complementando a análise do dispositivo, seguiu-se com a etapa de calibração que é dedicada a verificação experimental do funcionamento do dosador. A calibração do dispositivo consiste na realização de procedimentos experimentais, antes da etapa de ensaio com a célula de medição, e tem por objetivo definir estatisticamente a taxa do fluxo de partículas na saída do sistema conforme seus parâmetros de entrada. Tomou-se como base de montagem o esquema ilustrado na Fig. (5.14) e a balança semi-analítica foi posicionada na saída do dispositivo com o auxílio de um copo descartável. A partir dessa montagem, conforme a Fig. (5.17), foram definidos os procedimentos experimentais podendo ser descrito resumidamente nas seguintes partes:

A - Posicionamento dos cursos dos mecanismos (alimentador e raspador) até suas posições iniciais para permitir a inclusão de partículas no alimentador e que seja feita utilizando o maior volume possível;

B - Carregamento do mecanismo alimentador com as partículas e posterior assentamento das mesmas com o auxílio de um dispositivo vibrador até que não haja variação do nível superior das partículas e objetivando sua homogeneidade;

C - Realização de ensaios com duração máxima de 60 segundos variando a velocidade do motor do alimentador do limite inferior até o superior em 5 etapas repetidas 6 vezes mantendo constante a velocidade do motor do raspador. Ao final de cada ensaio, anotar o valor indicado na balança e zerar para o próximo ensaio;

D - Encerrar a calibração antes de ultrapassar o limite indicado pela metade do curso do tubo do alimentador ao final dessa etapa.

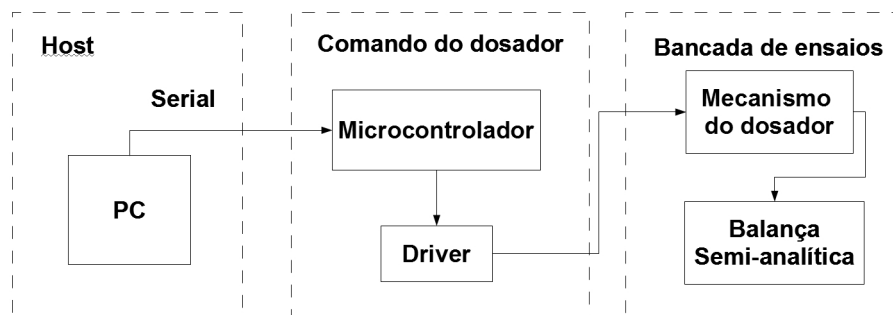


Figura 5.17: Esquema de montagem para calibração do dispositivo dosador

Dessa forma, é possível estabelecer uma curva que relaciona a velocidade do motor do alimentador com a taxa do fluxo de partículas Q_m em mg/s , mantendo-se a velocidade do motor do raspador para aquela configuração de partículas no interior do

tubo estabelecida no início da calibração. É importante notar que cada tipo de partícula terá uma granulometria diferente e o nível assentamento dependerá da realização da parte B dos procedimentos de calibração, podendo ou não obter o máximo da relação mg/mm^3 .

A Fig. (B.9) mostra uma foto da montagem utilizada para a calibração do dispositivo dosador. Foi levantada uma curva de calibração a partir dos procedimentos descritos anteriormente e a Fig. (5.18) ilustra este resultado.

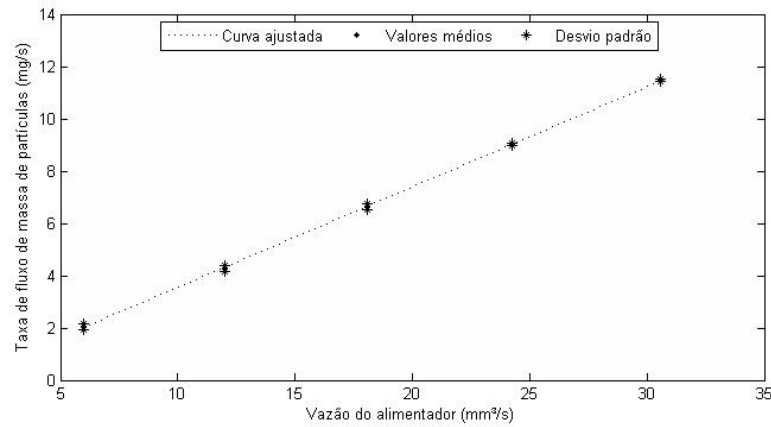


Figura 5.18: Exemplo de calibração do dispositivo dosador

Tabela 5.5: Calibração do dosador - Coeficientes da curva ajustada.

Coeficientes	Valor médio	Intervalo de confiança (95%)
a	0.383	[0.377 0.389]
b	-0.275	[-0.401 -0.149]

O gráfico mostra que com tal dispositivo é possível atingir a meta esperada de controle de fluxo de partículas e, de forma semelhante ao desenvolvimento da Eq. (5.1), pode ser apresentada uma relação entre as variáveis Q_m e Q_v a partir dos coeficientes da Tab. (5.5).

$$\begin{aligned}
 Q_m &= a * Q_v + b \\
 Q_m &= 0.383 * Q_v - 0.275
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

5.5 Geração e aquisição de sinais

O sistema montado para a aquisição de sinais foi reavaliado e optou-se por utilizar um equipamento US.Box, que substitui os equipamentos *pulser-receiver* e osciloscópio digital. O processamento de sinais foi realizado em MATLAB®, utilizando uma interface integrada ao sistema de atuação do dosador, que capta o sinal digital e o apresenta sob a forma de gráficos e valores numéricos.

O equipamento US.Box da Lecoeur Electronique modelo UT-SA-100 é um instrumento de teste ultrassônico que utiliza apenas um canal com excitação pulsada. O modo de operação da recepção do sinal pode ser selecionado entre captar a reflexão ou a transmissão. Para os ensaios por retro-espalhamento foi usado o modo de reflexão e por espalhamento a 90° foi usado o modo de transmissão.

Além disso, outras funcionalidades do equipamento foram exploradas, como a utilização de filtros, seleção da frequência de amostragem, ajustes da voltagem e comprimento do pulso, do ganho e atraso. A Tab. (5.6) mostra em detalhes as funções, sua descrição e as entradas necessárias para a configuração.

O equipamento é conectado ao PC via cabo USB que o alimenta e estabelece a comunicação de comando e aquisição de sinal Fig. (5.19). Os transdutores podem ser conectados ao equipamento pelos canais E (Tx/Rx) ou R (Rx), através de cabos coaxiais ⁷.

⁷Os cabos elétricos Coaxiais, substituem os antigos fios paralelos (aqueles fios colados um ao outro). Estes cabos Coaxiais transmitem energia da mesma forma, porém numa estrutura única, havendo no seu interior, a "alma" que é o condutor mais interno, e a "capa" que é o condutor mais externo

Tabela 5.6: Funções do equipamento USBox utilizadas para ajuste dos ensaios.

Funções	Descrição	Entradas	
Filtro/ Modo	Configuração do filtro/ Modo	Entrada1 1.25 MHz 2.5 MHz 5 MHz 10 MHz Banda larga	Entrada2 Pulso Eco Transmissão
Frequencia de amostragem/ Modo	Mudar frequencia de amostragem/ Modo	Entrada1 160 MHz 80 MHz 40 MHz 20 MHz 10 MHz	Entrada2 Pulso Eco Transmissão
Tensão	Ajuste da tensão do pulso	$10 < Entrada1 < 230(V)$	
Comprimento	Ajuste do comprimento do pulso	$0 < Entrada1 < 255(V)$	
Ganho	Ajuste do ganho	$Entrada1 = Ganho(dB)$	
Atraso	Ajuste do atraso	$Entrada1 = Atraso(\mu s)$	

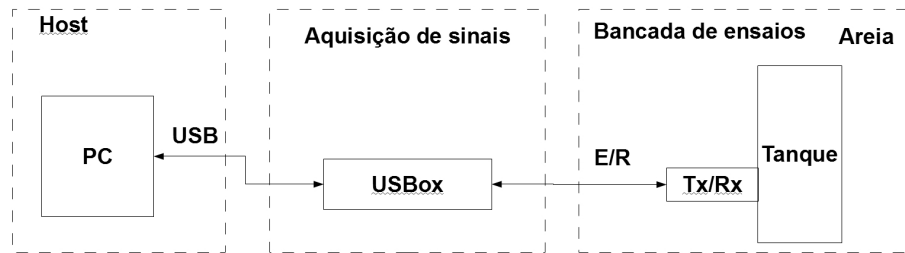


Figura 5.19: Diagrama de blocos do sistema de aquisição de ensaio

Este equipamento trabalha com excitação pulsada no terminal do transdutor e deve-se utilizar metade do comprimento de onda referente a frequência central de cada transdutor para que haja maior transferência de energia para o meio de progração. Um exemplo dessa excitação pode ser encontrada na Fig. (5.20), podendo ser verificado que o pulso possui tensão negativa e que não há muito rigor quanto a qualidade do pulso quadrado.

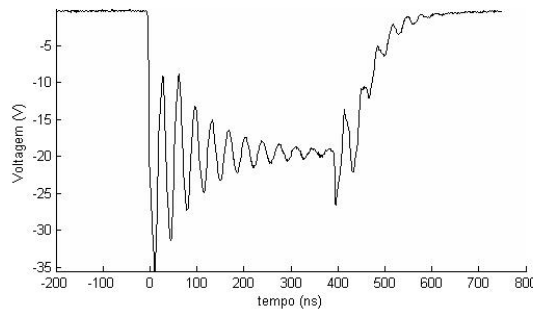


Figura 5.20: Exemplo de pulso de tensão negativa aplicado ao terminal do transdutor

5.5.1 Interface integrada à aquisição

O programa que controla o sistema de aquisição de sinais foi desenvolvido em MATLAB® R2009 e foi implementado na forma de interface gráfica contendo diversas rotinas. A Fig. (5.21) ilustra um diagrama de casos de uso mostrando como as rotinas foram implementadas no software de interface para o módulo de aquisição de sinais.

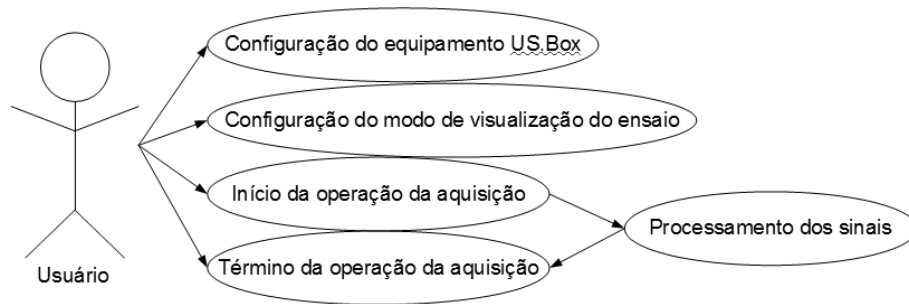


Figura 5.21: Diagrama de casos de uso do módulo de aquisição

As rotinas que configuram o equipamento ou aquisitam os sinais chamam funções especificadas na biblioteca DLL ⁸ que realiza a transferência de dados entre o PC e o equipamento US.Box.

5.6 Integração do sistema

O sistema de realização de ensaios pode ser dividido em quatro subsistemas diferentes: host, comando do dosador, aquisição de sinais e bancada de ensaios. A bancada de ensaio é composta pelo dosador automático e a célula de medição. A célula de medição, que até agora pode ser identificada como sendo o tanque de medição e os transdutores, foi integrada ao dispositivo de dosagem através de um tubo calandrado de aço.

5.6.1 Subsistemas

Foi montada uma bancada integrada Fig. (5.22) utilizando como host um PC que envia comandos ao subsistema de comando do dosador através da porta serial e envia e recebe do subsistema de aquisição de sinais pela porta USB os comandos e os sinais, respectivamente.

⁸*Dynamic-link library* (Biblioteca de ligação dinâmica) é a implementação feita pela Microsoft para o conceito de bibliotecas compartilhadas nos sistemas operacionais Microsoft Windows

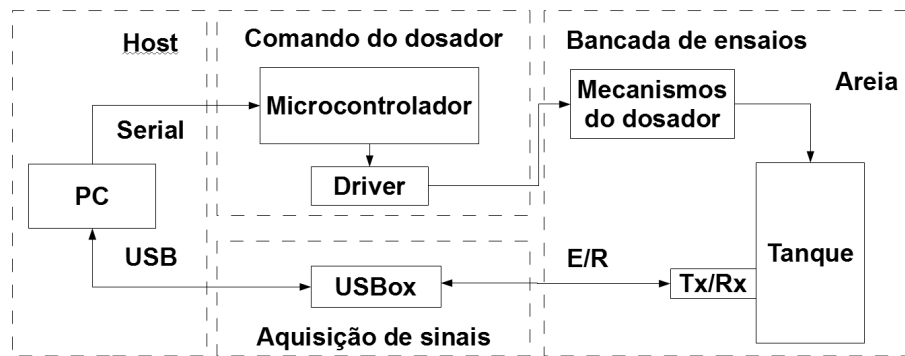


Figura 5.22: Diagrama de blocos do sistema integrado de ensaio

A Fig. (B.10) mostra a versão final do sistema. Um detalhe importante que deve ser levado em consideração é que, à medida que os resultados obtidos são validados e o gerenciamento do sistema se torna mais controlado, a tendência é aumentar a qualidade dos equipamentos com intenção de torná-los cada vez mais específicos a cada iteração do ciclo de projeto.

5.6.2 Interface integrada ao comando do dosador

No desenvolvimento do programa de interface homem-máquina (IHM), foi necessária a implementação de um módulo de dosagem que fosse responsável por enviar os comandos ao seu subsistema. O módulo de dosagem é muito parecido com o de aquisição, mas possui suas peculiaridades nos casos de configuração e operação. Resumidamente, com este módulo o usuário pode configurar uma conexão com dispositivo dosador via RS-232 através da interface COM ⁹, configurar o modo de operação dos motores através de comandos e parâmetros, iniciar ou terminar a operação da dosagem.

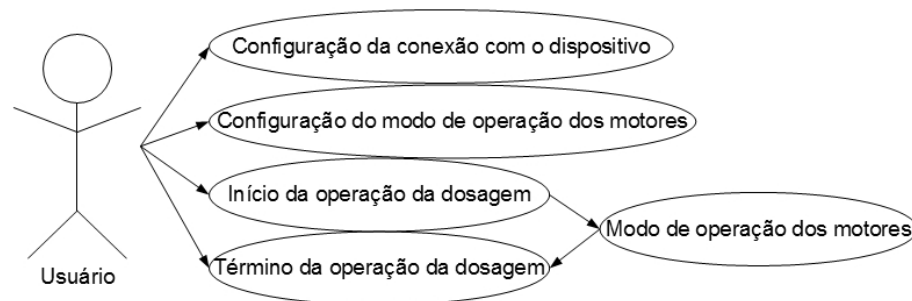


Figura 5.23: Diagrama de casos de uso da do módulo de dosagem

Continuando com o conceito de divisão por módulos, foi implementado mais

⁹Component Object Model (COM) é uma plataforma para componentes de software, ela é usada para permitir a comunicação entre processos e a criação dinâmica de objetos em qualquer linguagem de programação que suporte a tecnologia

um módulo responsável pela integração dos outros dois (aquisição e dosagem). Esse módulo possui um caso de uso importante de configuração da operação integrada do ensaio que implementa algumas funções, como por exemplo, a de atraso entre os casos de processamento de sinais e do modo de operação dos motores e está ilustrado na Fig. (5.24).

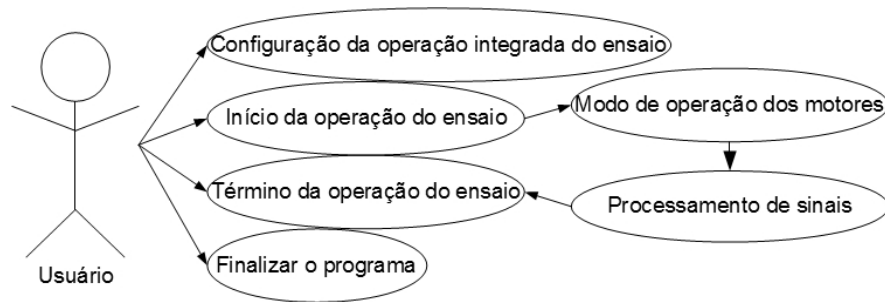


Figura 5.24: Diagrama de casos de uso do módulo de integração

5.7 Ensaio com partículas de microesferas de vidro

Antes de iniciar os primeiros testes do sistema de medição utilizando o dosador automático, foi feita uma pesquisa no mercado para descobrir se existia algum tipo de partícula que substituísse as da areia para que fosse possível realizar ensaios mais padronizados. A pesquisa levou a aquisição de partículas abrasivas para jateamento com granulometria mais bem definida que a da areia. Essas partículas são de microesferas de vidro e possuem dimensões (microns), malha (mesh) e esfericidade definidas pelo fabricante.

Após ter sido feito a identificação e caracterização das partículas utilizando uma câmera digital de grande aumento, alguns ensaios foram realizados na tentativa de verificar a mesma correlação encontrada nos ensaios anteriores.

5.7.1 Identificação e caracterização das partículas

As partículas de microesferas de vidro foram adquiridas da empresa Jatomaq, que produz partículas abrasivas para jateamento. Elas são comercializadas em granulometrias usuais e foram escolhidos dois tipos (RD e RH) que pudessem fornecer resultados importantes no ensaio por espalhamento acústico. O fabricante fornece as especificações através de dados tabelados que foram resumidas na Tab. (5.7).

Tabela 5.7: Granulometria usuais retirado do site do fabricante.

Tipo	Microns	Malha	Esfericidade
RD	105-210	70-140	80%
RH	44-88	170-325	85%

Em seguida, procedeu-se com a identificação das partículas através da câmera digital. Notou-se que as microesferas de vidro apresentavam grande semelhança com a areia fina em sua granulometria e que poderiam ser utilizadas para simular os ensaios realizados anteriormente. De acordo com o que foi discutido no item 5.2.2, pode-se sugerir que haja maior ou menor sensibilidade da célula dependendo do tipo de partícula e da frequência do transdutor utilizada.



Figura 5.25: Imagem das microesferas de vidro do tipo RD retirada através de uma câmera digital CCD.

5.7.2 Realização dos ensaios

O sistema de aquisição foi configurado para operar a uma frequência de amostragem de 80MHz , largura de pulso de aproximadamente 500ns , voltagem do pulso de 230V e ganho de recepção de 60dB . Foi feita uma sequência de ensaios e os sinais da aquisição foram armazenados na forma de uma série de a-scan no tempo utilizando um transdutor de frequência central de 10MHz .

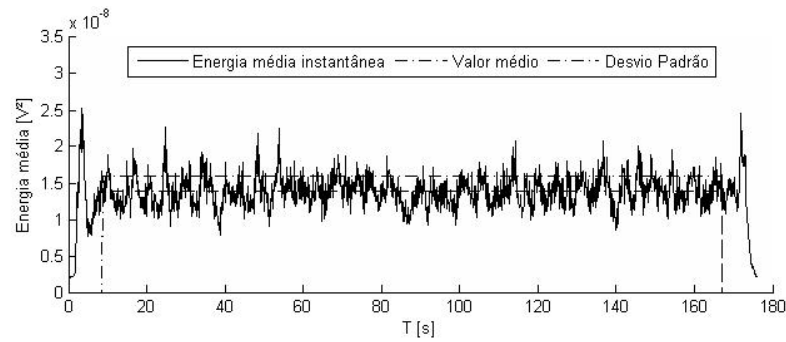


Figura 5.26: Exemplo de série temporal da energia média de cada a-scan durante um período de ensaio

Como ilustrado na Fig. (5.26), o mesmo processamento de análise da energia do sinal retro-espalhado pode ser realizado em tempo real enquanto as partículas de vidro caem ao longo do tanque. A Fig. (5.27) a seguir apresenta esses resultados obtidos através da repetição de 8 ensaios para 5 velocidades diferentes do mecanismo alimentador, cada ensaio foi realizado considerando um período de aproximadamente 300s. Dessa forma, será possível fazer uma conversão da vazão do alimentador (mm^3/s) para a taxa do fluxo (mg/s) a partir do modelo empírico.

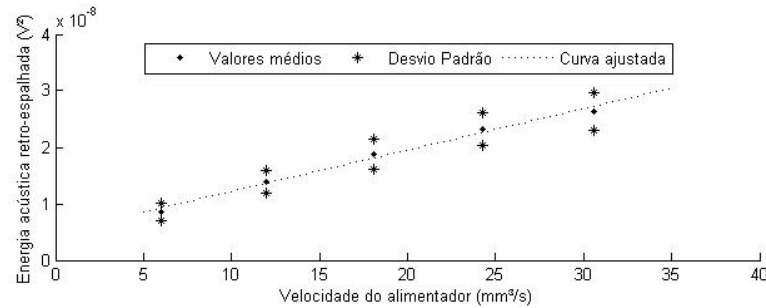


Figura 5.27: Energia acústica retroespalhada do ensaio com partículas de microesferas de vidro.

Tabela 5.8: Calibração do medidor - Coeficientes da curva ajustada.

Coeficientes	Valor médio	Intervalo de confiança (95%)
a	7.307×10^{-10}	$[5.95 \ 8.664] \times 10^{-10}$
b	4.902×10^{-9}	$[2.169 \ 7.636] \times 10^{-9}$

Novamente será apresentada a relação entre as variáveis Q_m e Q_v a partir dos coeficientes da Tab. (5.8).

$$\begin{aligned}
V_{rms}^2 &= a * Q_v + b \\
V_{rms}^2 &= (7.31 * Q_v + 49.02) * 10^{-10}
\end{aligned} \tag{5.5}$$

Dessa forma, é possível comparar os coeficientes encontrados na calibração do dosador com os coeficientes do medidor. Os valores encontrados nas equações Eq. (5.4) e Eq. (5.5) serão usados como referência para estabelecer a relação entre as variáveis V_{rms}^2 e Q_m , ou seja, a relação entre a energia acústica retro-espalhada e a taxa de fluxo de massa de partículas.

$$V_{rms}^2 = (1.9086 * Q_m + 5.4269) * 10^{-9} \tag{5.6}$$

A partir dos coeficientes da equação Eq. (5.6) é possível estimar a taxa de fluxo de massa de partículas no sistema *online* de detecção de partículas dado o arranjo experimental utilizado para realizar a calibração dos instrumentos.

6 CONCLUSÕES

As informações iniciais relacionadas aos sensores, as técnicas e ensaios por ultra-som foram descritas de forma situar o trabalho na área de concentração da mecatrônica e sistemas mecânicos. Foi realizada uma pesquisa descritiva sobre as técnicas de caracterização de amostras de partículas sólidas em meios líquidos.

Foi projetado e fabricado um protótipo de tanque de testes, incluindo câmara de medição e adaptadores para transdutores ultrassônicos. A fabricação das peças e sua montagem foram realizadas na oficina do PMR. Algumas rotinas de programas foram implementadas que fazem a aquisição e armazenamento dos sinais referentes aos ensaios. Foi montada uma bancada simplificada para obter os primeiros resultados e análises positivas da técnica utilizada. Foi utilizado o programa de computação técnica MATLAB® e equipamentos eletrônicos como um osciloscópio digital e um pulser-receiver.

Para realizar ensaios automáticos, padronizados e com um fluxo constante de partículas sólidas foi projetado um dispositivo dosador e seus requisitos foram descritos de maneira a obter uma taxa variável de fluxo em massa de partículas. Foram realizados ensaios com uma balança semi-analítica para levantar uma curva de calibração do dispositivo para operar na faixa de 2 a 20mg/s. Esta faixa de operação foi analisada no interior da célula de medição e estimou-se que era equivalente a um intervalo de aproximadamente 200 a 2000ppm de partículas em meio líquido.

Foi incluído na montagem um equipamento portátil de aquisição que possibilita a configuração de funções utilizadas através do PC. Além disso, foi desenvolvido um programa de integração do sistema que permite o operador programar os ensaios e monitorar os resultados. Em seguida, foram feitos ensaios com o objetivo de calibrar a célula de medição para obter as relações necessárias para a determinação do teor de partículas de amostras não controladas.

Foi obtida uma amostra de óleo da Petrobras com características que poderá ser utilizada na etapa de caracterização do petróleo por ultrassom através de uma célula de

medição de densidade. Os resultados obtidos podem ser utilizados para tirar conclusões a respeito da viabilidade técnica de aplicar a metodologia desenvolvida na medição do teor de partículas de areia em óleo.

6.1 Trabalhos futuros

Sugere-se um estudo da sensibilidade do medidor com a frequência do transdutor e tamanho das partículas sólidas. Além do desenvolvimento de uma célula para medição com fluxo contínuo de amostras em laboratório. A aplicação da célula para a medição em campo do teor de areia em óleo, em substituição ao sistema de peneiras. Deverá ser iniciado um projeto de uma célula de medição adaptável a uma tubulação e será levado em consideração os resultados de sensibilidade do medidor obtidos nos ensaios apresentados neste trabalho. Conforme o resultado do estudo da viabilidade de aplicação técnica, poderá ser concluído se a técnica, a metodologia e os equipamentos utilizados são suficientes para obter a fração de volume de partículas sólidas encontradas em amostras de óleo cru. Além disso, o modelo de retro-espalhamento baseado na teoria da resposta impulsiva do pistão plano pode ser aprimorado para obter informações relativas às propriedades das partículas sólidas e do meio líquido .

REFERÊNCIAS

- [1] J. C. Adamowski. *Medição de densidade de líquidos por ultra-som*. PhD thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.
- [2] F. Buiochi. *Medição de viscosidade de líquidos por ultrasom*. PhD thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- [3] F. Bacaneli. Determinação do teor de gordura no leite através de parâmetros acústicos. Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.
- [4] JJ FARAN. Sound scattering by solid cylinders and spheres. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 23(4):405–418, 1951.
- [5] Baron John William Strutt Rayleigh. *The Theory of Sound*. Dover Publications, 1945.
- [6] J. David N. Cheeke. *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC Press, 2002.
- [7] LL FOLDY. The Multiple Scattering Of Waves .1. General Theory Of Isotropic Scattering By Randomly Distributed Scatterers. *Physical Review*, 67(3-4):107–119, 1945.
- [8] M LAX. Multiple Scattering Of Waves. *Reviews Of Modern Physics*, 23(4):287–310, 1951.
- [9] JF CHEN, JA ZAGZEBSKI, and EL MADSEN. Tests of backscatter coefficient measurement using broad-band pulses. *IEEE Transactions On Ultrasonics Ferroelectrics And Frequency Control*, 40(5):603–607, SEP 1993.
- [10] Cheng He and Alex E. Hay. Broadband measurements of the acoustic backscatter cross section of sand particles in suspension. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 94(4):2247–2254, 1993.
- [11] AM CRAWFORD and AE HAY. Determining suspended sand size and concentration from multifrequency acoustic backscatter. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 94(6):3312–3324, 1993.
- [12] Stephanie A. Moore and Alex E. Hay. Angular scattering of sound from solid particles in turbulent suspension. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 126(3):1046–1056, 2009.
- [13] JY SHENG and AE HAY. An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 83(2):598–610, 1988.
- [14] AE HAY. Sound scattering from a particle-laden, turbulent jet. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 90(4, Part 1):2055–2074, 1991.
- [15] RE Challis, JS Tebbutt, and AK Holmes. Equivalence between three scattering formulations for ultrasonic wave propagation in particulate mixtures. *Journal Of Physics D-Applied Physics*, 31(24):3481–3497, 1998.
- [16] Belfor Galaz, Guillaume Haiat, Romain Berti, Nicolas Taulier, Jean-Jacques Amman, and Wladimir Urbach. Experimental validation of a time domain simulation of high frequency ultrasonic propagation in a suspension of rigid particles. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 127(1):148–154, 2010.
- [17] ISO 20998-1:2006. *Measurement and characterization of particles by acoustic methods – Part 1: Concepts and procedures in ultrasonic attenuation spectroscopy*. ISO International Organization for Standardization, 2006.
- [18] A.S. Dukhin and P.J. Goetz. *Ultrasound for characterizing colloids*. Elsevier, 2002.
- [19] RA YOUNG, JT MERRILL, TL CLARKE, and JR PRONI. Acoustic profiling of suspended sediments in the marine bottom boundary-layer. *Geophysical Research Letters*, 9(3):175–178, 1982.

- [20] PD THORNE and SC CAMPBELL. Backscattering by a suspension of spheres. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 92(2, Part 1):978–986, 1992.
- [21] A DOWNING, PD THORNE, and CE VINCENT. Backscattering from a suspension in the near-field of a piston transducer. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 97(3):1614–1620, 1995.
- [22] PD Thorne and DM Hanes. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. *Continental Shelf Research*, 22(4):603–632, 2002.
- [23] PD Thorne and MJ Buckingham. Measurements of scattering by suspensions of irregularly shaped sand particles and comparison with a single parameter modified sphere model. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 116(5):2876–2889, 2004.
- [24] Lawrence E. Kinsler. *Fundamentals of acoustics*. Wiley, 1982.
- [25] J. P. Weight. Ultrasonic Beam Structures In Fluid Media. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 76(4):1184–1191, 1984.
- [26] JP WEIGHT and AJ HAYMAN. Observations of propagation of very short ultrasonic pulses and their reflection by small targets. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 63(2):396–404, 1978.
- [27] RT Higuti and JC Adamowski. Ultrasonic densitometer using a multiple reflection technique. *IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL*, 49(9):1260–1268, 2002.
- [28] Benjamin D. Moate and Peter D. Thorne. Measurements and inversion of acoustic scattering from suspensions having broad size distributions. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 126(6):2905–2917, 2009.
- [29] Panametrics. Ultrasonic transducers. Technical report, Olympus Corporations, 2008. <http://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/panametrics-UT.en.pdf>.
- [30] Parker. Parker o-ring handbook. Technical report, Parker Hannifin Corporation., 2007. http://www.parker.com/literature/ORD20570020Parker_O-Ring_Handbook.pdf.
- [31] ISO 1207:1992. *Slotted cheese head screws – Product grade A*. ISO International Organization for Standardization, 1992.
- [32] ISO 4032:1999. *Hexagon nuts, style 1 – Product grades A and B*. ISO International Organization for Standardization, 1999.
- [33] THK. Lm-guide actuator type kr. Technical report, THK Co., Ltd., 2002. <https://tech.thk.com/en/products/pdf/en_a2_002.pdf#1>.
- [34] Kalatec. Motor de passo nema 34. Technical report, Kalatec Automação Industrial, 2002. <http://www.kalatec.com.br/catalogo/motor_de_passo/nema23.pdf>.

ANEXO A - DESENHOS TÉCNICOS

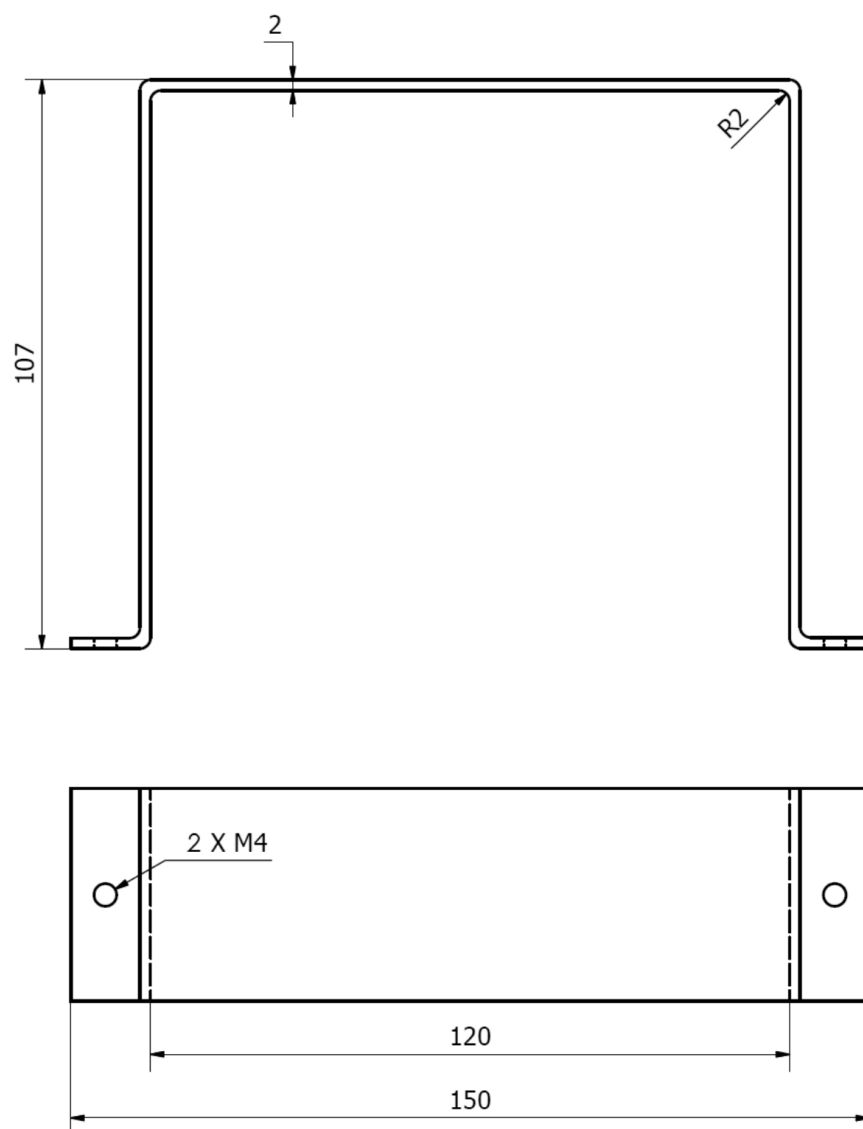


Figura A.1: Desenho técnico da alça

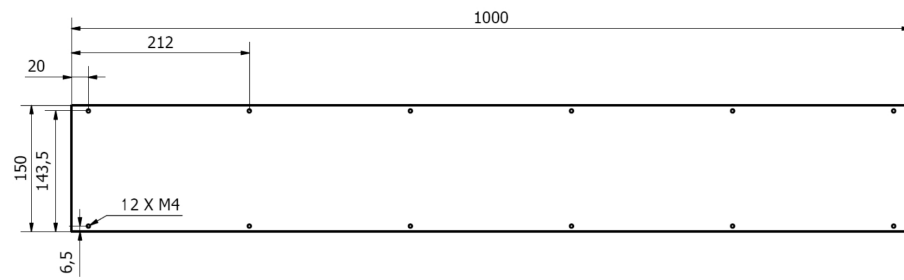


Figura A.2: Desenho técnico do fundo

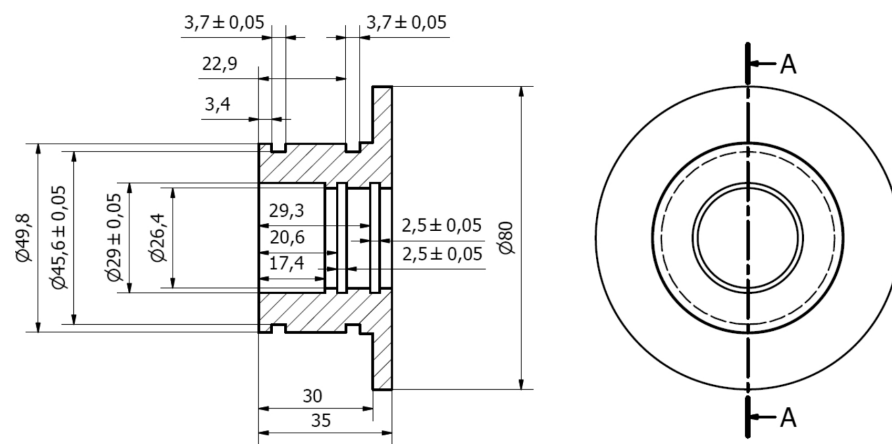


Figura A.3: Desenho técnico do adaptador

ANEXO B - FOTOS



Figura B.1: Foto do tanque



Figura B.2: Foto do adaptador

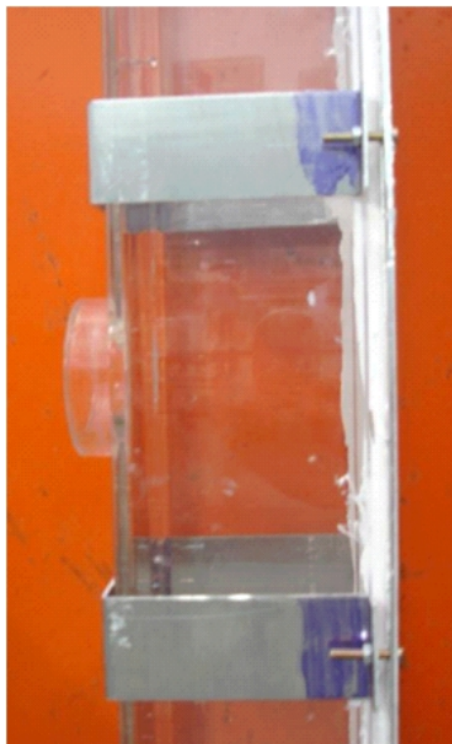


Figura B.3: Foto do detalhe do tanque

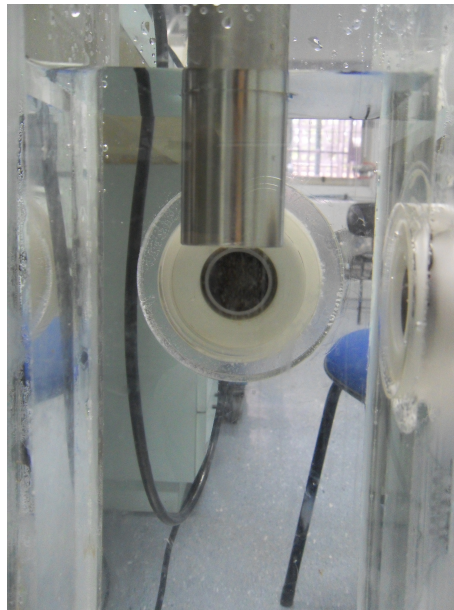


Figura B.4: Foto da célula de detecção de areia

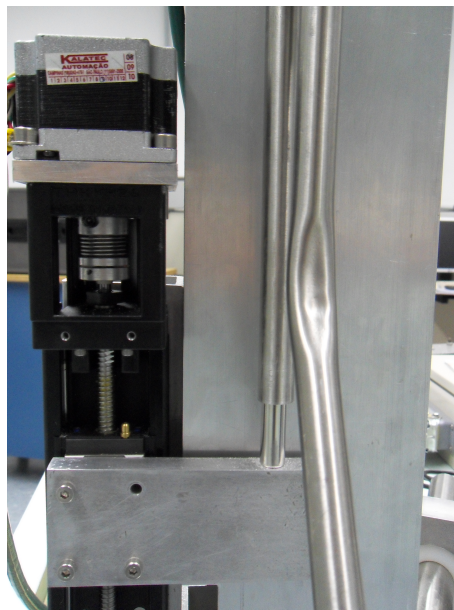


Figura B.5: Foto do mecanismo alimentador

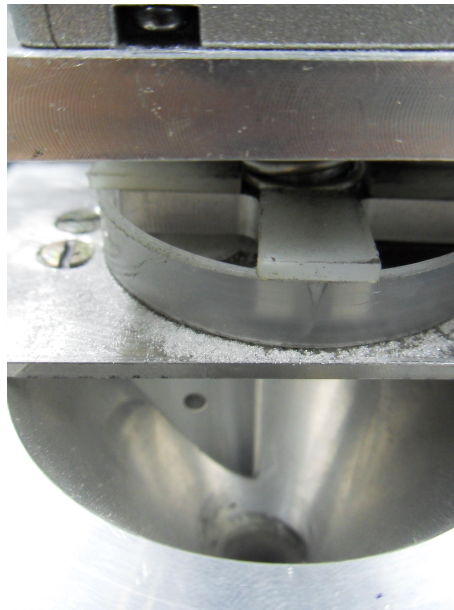


Figura B.6: Foto do mecanismo raspador

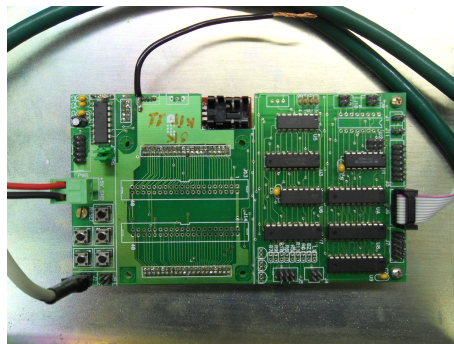


Figura B.7: Foto da placa de desenvolvimento

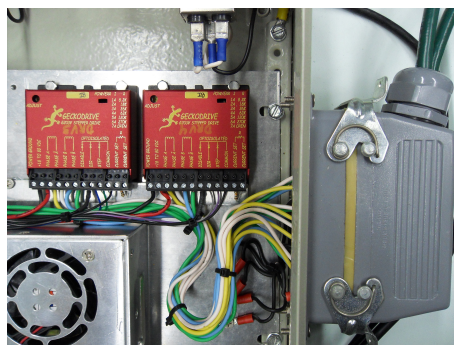


Figura B.8: Foto dos drivers de motor de passo - Geckodriver's

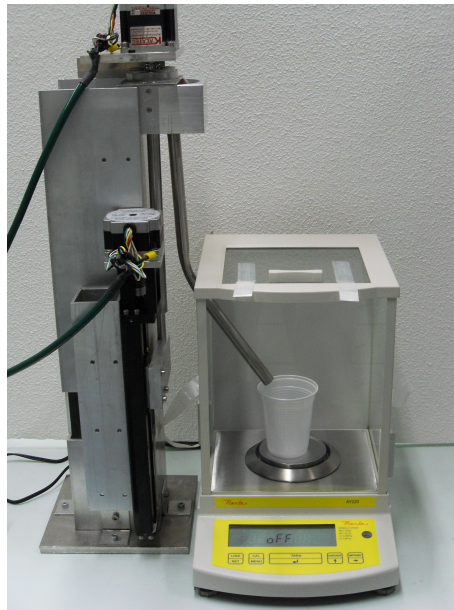


Figura B.9: Foto da montagem para calibração do dispositivo dosador

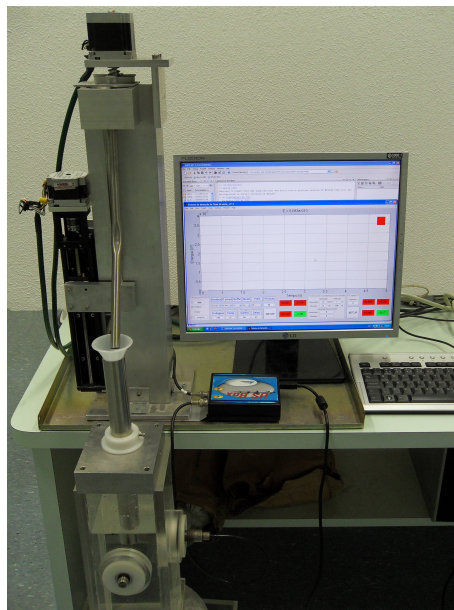


Figura B.10: Foto do sistema integrado de ensaio