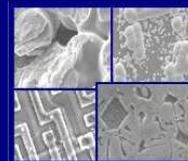




PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA ULTRASSONOGRAFIA NO
IMAGEAMENTO NÃO INVASIVO DE DEPÓSITOS SEDIMENTARES
SIMULADOS EM LABORATÓRIO**

JÚLIO CÉSAR GALL PIRES

LICENCIADO EM FÍSICA

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

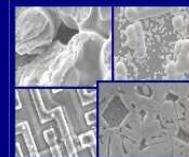
**Porto Alegre
Janeiro, 2014**



PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA ULTRASSONOGRAFIA NO
IMAGEAMENTO NÃO INVASIVO DE DEPÓSITOS SEDIMENTARES
SIMULADOS EM LABORATÓRIO**

JÚLIO CÉSAR GALL PIRES

LICENCIADO EM FÍSICA

ORIENTADOR: PROF. DR. RICARDO MEURER PAPALÉO

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre
Janeiro, 2014**

*“Tenho a impressão de ter sido
uma criança brincando à beira-mar,
divertindo-me em descobrir
uma pedrinha mais lisa
ou uma concha mais bonita que as outras,
enquanto o imenso oceano da verdade
continua misterioso diante de meus olhos”.*

Isaac Newton



ANÁLISE DO DESEMPENHO DA ULTRASSONOGRRAFIA NO IMAGEAMENTO NÃO INVASIVO DE DEPÓSITOS SEDIMENTARES SIMULADOS EM LABORATÓRIO

CANDIDATO: JÚLIO CÉSAR GALL PIRES

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

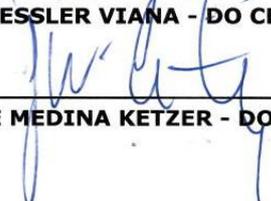


DR. RICARDO MEURER PAPAEO - ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA



DR. ADRIANO ROESSLER VIANA - DO CENPES - PETROBRÁS



DR. JOÃO MARCELO DE MEDINA KETZER - DO PGETEMA/FENG - PUCRS

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José Carlos e Jussara, que durante a longa espera foram sempre compreensivos e iluminaram os caminhos obscuros com afeto e dedicação para que os trilhassem sem medo e cheio de esperanças.

Ao meu irmão, Marco pelo incentivo e apoio dados.

AGRADECIMENTOS

À PETROBRAS por oportunizar esse projeto.

Ao professor Papaléo, pelo conhecimento transmitido, por toda dedicação ao longo do trabalho e pela orientação que foram muito importantes para a realização dessa dissertação.

A todos os professores do PGETEMA e ao apoio dos professores Cássio e Daniel.

A professora Roseane, do Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo - LENEP/RJ, da Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF.

Ao Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

Aos professores membros da banca examinadora deste trabalho pela contribuição e enriquecimento do mesmo.

Aos estagiários Thiago, Rômulo, Camila e Priscila, pela dedicação e esforço, pois com certeza facilitaram a jornada de preparar e organizar materiais e dados coletados, pois inúmeros contratempos foram superados.

A todos os colegas e amigos do prédio 96 A Tecnopuc, com os quais tive a satisfação de conviver nesse período (Cláudia, Daniela, Raquel, Elisa, Leandro, Jeferson) pela amizade e companheirismo.

Por fim, a todas as pessoas que me incentivaram a sempre seguir em frente e me apoiaram acreditando na realização dessa conquista.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	5
AGRADECIMENTOS	6
SUMÁRIO	7
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE QUADROS	17
LISTA DE SÍMBOLOS	18
RESUMO.....	19
ABSTRACT	22
1. INTRODUÇÃO	24
2. OBJETIVOS	27
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3.1. Histórico.....	29
3.2. Características das Ondas Sonoras	30
3.3. Propriedades Acústicas dos Materiais.....	30
3.3.1. Velocidade de Propagação [3]	31
3.3.2. Impedância Acústica Específica [10]	33
3.3.3. Atenuação[12]	34
3.4. Comportamento do Som em Interfaces Acústicas [13, 14].	35
3.5. Princípio de Funcionamento de um Equipamento de Ultrassom	37
3.5.1. Transdutor de Ultrassom e Materiais Piezoelétricos.....	39
3.5.2. Geometria do Feixe Ultrassônico [19].....	42
3.6. Correntes de Densidade e Simulações de Depósitos Sedimentares Analisados por Ondas Acústicas [20].....	45

3.7. Uso de Ultrassom no Imageamento de Depósitos Sedimentares	47
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
4.1. Materiais Empregados	49
4.2. Tanques e Objetos de Teste	51
4.3. Ecógrafos	52
4.4. Procedimento de Medida e Aquisição de Imagens	55
4.4.1. Medidas de Tempo de Sedimentação dos Materiais	57
4.4.2. Profundidade Máxima de Visualização	58
4.4.3. Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas em Materiais Sedimentados	60
4.5. Microscopia Óptica	63
4.6. Microscopia Eletrônica de Varredura	64
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
5.1. Características dos Materiais Experimentados nos Modelos	66
5.2. Dinâmica de Sedimentação do Carvão 205	75
5.2.1. Efeitos da Coluna de Água	76
5.3. Velocidade de Propagação do Som em Diferentes Materiais em Água ..	78
5.4. Profundidade Máxima de Visualização	83
5.5. Visualização da Topografia de Modelos Físicos	89
5.6. Velocidade de Propagação Acústica obtidos no Ultrassom Industrial ...	90
5.6.1. Efeito da Granulometria no Contraste entre Interfaces.....	93
5.6.2. Análise de Topografia de Superfície	94
5.7. Contraste Acústico dos Diferentes Materiais	95
5.7.1. Contraste em Duas Camadas Sobrepostas.....	95
5.7.2. Contraste de Duas Camadas de Sedimento com Três Materiais Diferentes Justapostos	96

5.7.3. Contraste de Uma Camada de Sedimento Variando o Tipo de Material e Granulometria.....	98
5.8. Discussão dos Valores de Velocidade de Propagação, Contraste e Profundidade	102
6. CONCLUSÕES.....	105
7. PERSPECTIVAS FUTUROS	108
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1.Representação do espectro acústico com os limites de referência30
- Figura 3.2.Esquema mostra o processo de aquisição do sinal no *Modo A*.38
- Figura 3.3.Esquema mostra sistema de obtenção de imagem de ultrassom no *Modo B*.39
- Figura 3.4.Esquema de um transdutor de ultrassom e seus componentes 40
- Figura 3.5. Curvas de frequência de transdutores com alto e baixo amortecimento .41
- Figura 3.6. Representação da composição de um feixe ultrassônico42
- Figura 3.7. Representa como a resolução espacial axial é afetada pelo comprimento espacial da onda.42
- Figura 3.8.Representação dos efeitos da resolução lateral nos pontos 1 e 244
- Figura 4.1. Fotografia de um ecógrafo da marca Siemens modelo *Sonoline 7,5 L*...52
- Figura 4.2.a) Representação esquemática do sistema ultrassônico de baixa frequência usado no LENEP, onde 1 é o digitalizador do sinal de recepção, 2 é o pré amplificador e o filtro passa alta, 3 é o emissor de sinal, 4 é a central de armazenamento e controle dos motores de passo em 5. b) Fotografia do equipamento mostrando no detalhe em vermelho os transdutores (emissor e receptor) nos modelos, bem como motores e guias de movimentação.....53
- Figura 4.3.Imagem de artefato de bordas num béquer de diâmetro 10 cm com amostra de sedimento e água. A região em forma de “V” mostra o artefato (A - A’). 56
- Figura 4.4.Representação da proveta com carvão sedimentado (Δh_1) e colunas de água pequena (P), média (M) e grande (G).....57
- Figura 4.5. Em a) é mostrada a imagem ecográfica feita a partir do material balotine sedimentado em um béquer; em b) o gráfico do perfil, intensidade por distância,

gerado pelo software *Image J*. O fundo do modelo aparece no pico indicado pela letra “F”, já a profundidade máxima do sinal por “Z_{máx}”59

Figura 4.6. Penetração máxima do sinal em três espessuras de sedimento.....58

Figura 4.7. Esboço dos modelos físicos utilizados com três espessuras diferentes de material (10, 20 e 30 mm), usando o transdutor linear com as frequências de 5,0 MHz e 7,5 MHz.....62

Figura 5.1. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV – 100x) para classificar os materiais pela geometria da partícula, onde temos: a) carvão 205, b) areia (quartzo), c) calcário, d) balotina (vidro), e) Poli(metilmetacrilato) (PMMA), f) Poli(metilmetacrilato) com grafite (GPMMA), g) Resina poliéster pura (RP) e h) Resina poliéster com negro de fumo (RPNF).....66

Figura 5.2. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV – 300x) para classificar os materiais pela geometria da partícula, onde temos: a) carvão 205, b) areia (quartzo), c) calcário, d) balotina (vidro), e) Poli(metilmetacrilato) (PMMA), f) Poli(metilmetacrilato) com grafite (GPMMA), g) Resina poliéster pura (RP) e h) Resina poliéster com negro de fumo (RPNF).....67

Figura 5.3. Imagens de microscopia óptica para verificar a estrutura interna das partículas dos materiais, onde temos: a) carvão 205, b) areia (quartzo), c) calcário, d) balotina (vidro), e) Poli(metilmetacrilato) (PMMA), f) Poli(metilmetacrilato) com grafite (GPMMA), g) Resina poliéster pura (RP) e h) Resina poliéster com negro de fumo (RPNF).....68

Figura 5.4. a) Curvas granulométricas dos materiais convencionais com granulometrias entre 180-250 µm. b) Curvas granulométricas dos novos compósitos com granulometrias entre 180-250 µm. Em ambos os casos os materiais foram peneirados e lavados.....70

Figura 5.5. Curvas granulométricas do carvão 210, Poli(metilmetacrilato) (PMMA), Resina poliéster pura (RP), Poli(metilmetacrilato) com grafite (GPMMA) e Resina poliéster com negro de fumo (RPNF) na faixa de 500 a 1700µm.....70

Figura 5.6. Padrões gráficos indicando o grau de esfericidade e arredondamento para fins de comparação com os materiais em questão.....	72
Figura 5.7. Representação do comportamento metaestável durante o processo de sedimentação.....	74
Figura 5.8. Fotografia de pequenos cones que se formam na superfície do sedimento, quando a água que permeia as partículas é expulsa durante a acomodação do material.....	75
Figura 5.9. Gráfico de sedimentação realizado em proveta pequena (100 mL).....	76
Figura 5.10. Gráfico de sedimentação realizado em proveta média (2000 mL).....	76
Figura 5.11. Gráfico de sedimentação realizado em proveta grande (7000 mL).....	77
Figura 5.12. Imagens das amostras de carvão 205 para determinação da velocidade de propagação no material, em três espessuras diferentes (Z_{nom}), usando o transdutor linear com a frequência de 5,0 MHz e de 7,5 MHz.....	78
Figura 5.13. Em a) Imagem ecográfica feita a partir do material RPNF sedimentado e em b) Gráfico da distância por tons de cinza da imagem, representada pela linha em azul na imagem a).....	83
Figura 5.14. Montagem de cinco ecografias para análise de topografia de superfície.....	88
Figura 5.15. Interfaces do modelo físico de duas camadas (carvão e areia grossa).....	90
Figura 5.16. Fotografia do modelo físico da amostra de areia grossa com carvão e sismograma, feita com 50 pontos de tiro, 200 tiros por ponto, passo de 2 mm, usando uma frequência de 250 kHz e aplicados ao transdutor uma tensão de 12 V.....	91
Figura 5.17. a) Interfaces de um modelo de Carvão e areia grossa, onde (1) é a interface água/carvão; (2) é a interface carvão /areia grossa e (3) é a interface areia grossa/fundo. b) Imagem pós-processada por interpolação.....	92

Figura 5.18. a) Interfaces de um modelo de Carvão e areia fina, onde(1) é a interface água/carvão; (2) é a interface carvão/areia fina e (3) é a interface areia fina/fundo. b) Imagem pós-processada por interpolação.....93

Figura 5.19. Fotografia do modelo físico da amostra de areia grossa com carvão e sismograma, feita com 50 pontos de tiro, 200 tiros por ponto, passo de 2 mm, usando uma frequência de 250 kHz e aplicados ao transdutor uma tensão de 12 V.93

Figura 5.20. a) Imagem de uma amostra heterogênea de carvão e areia depositados em um béquer onde se observa diferenças de contraste devido aos materiais utilizados para as freqüência de 5 e 7,5 MHz em a) e b), respectivamente.....94

Figura 5.21 Imagem de uma amostra heterogênea de carvão e balotine depositados em um béquer, onde se observa diferenças de contraste devido aos materiais utilizados para as freqüência de 5 e 7,5 MHz em a) e b), respectivamente.....95.

Figura 5.22 Imagem de uma amostra heterogênea de areia grossa e carvão depositados em um béquer, onde não há diferença de contraste devido aos materiais utilizados para as freqüência de 5 e 7,5 MHz em a) e b), respectivamente95

Figura 5.23. Imagem mostrando a diferença de contraste dos materiais balotine, carvão e areia.....96

Figura 5.24.Imagem mostrando a diferença de contraste dos materiais balotine, poliéster fino e carvão.....96

Figura 5.25. Imagem mostrando a diferença de contraste dos materiais carvão, poliéster grosso e balotine.....97

Figura 5.26. Imagem mostrando a diferença de contraste dos materiais poliéster grosso, areia e poliéster fino.....97

Figura 5.27. Imagem mostrando a diferença de contraste dos materiais areia e balotine.....97

Figura 5.28. Fotografia do modelo físico mostrando diferentes materiais com a mesma granulometria. (média 1000 μ m).....	98
Figura 5.29. Imagem mostrando o contraste de diferentes materiais com a mesma granulometria. (média 1000 μ m).....	98
Figura 5.30. Fotografia a) vista frontal do modelo físico mostrando diferentes materiais com diferentes granulometria. b) vista de cima do modelo físico mostrando diferentes materiais com diferentes granulometria.....	99
Figura 5.31. Imagem mostrando o mesmo materiais com diferentes granulometria. (Resina poliéster pura).....	99
Figura 5.32. Imagem mostrando o mesmo materiais com diferentes granulometria. (Resina poliéster com sulfato de bário).....	99
Figura 5.33. Imagem mostrando o mesmo materiais com diferentes granulometria. (Resina poliéster com negro de fumo).....	100
Figura 5.34. Imagem mostrando diferentes materiais com a mesma granulometria. (fino 250-425 μ m).....	100
Figura 5.35. Imagem mostrando diferentes materiais com a mesma granulometria. (médio 1000 μ m).....	100
Figura 5.36. Imagem mostrando diferentes materiais com a mesma granulometria. (grosso 2000 μ m).....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.Velocidade do som em tecidos biológicos, não biológicos e para a água, mostrados em azul, cinza e verde, respectivamente.....	31
Tabela 3.2.Valores das impedâncias acústicas para diferentes tecidos.....	32
Tabela 3.3.Valores das impedâncias acústicas para diversos tipos de materiais....	33
Tabela 3.4.Coefficiente de atenuação médio para diversos tecidos a 1MHz.....	34
Tabela 3.5.Coefficiente de atenuação médio para materiais não biológicos a 1 MHz.....	34
Tabela 5.1. Características dos materiais quanto a tamanho e forma da partícula..	71
Tabela 5.2.Características dos materiais quanto a massa específica e velocidade de queda. O erro associado aos valores de velocidade, em todos os casos, ficou em torno de 30% para mais e para menos.....	73
Tabela 5.3. Valores das velocidades de propagação do som no Carvão 205 e no carvão 210.....	78
Tabela 5.4. Valores das velocidades de propagação do som no Calcário, Areia (<180µm), areia (180-250 µm) e no Balotina (<180µm).....	79
Tabela 5.5. Valores das velocidades de propagação do som RP (<180 µm), RP (180-250 µm), RPNF (<180 µm) e RPNF (180-250 µm).....	80
Tabela 5.6. Valores das velocidades de propagação do som RPNF (médio), GPMMA (<180 µm), GPMMA (180-250 µm) e GPMMA (médio).....	81
Tabela 5.7. Valores das velocidades de propagação do som RPNF (médio), GPMMA (<180 µm), GPMMA (180-250 µm) e GPMMA (médio).....	82
Tabela 5.8.Valores de penetração máxima do sinal Carvão 205 (180-250 µm).....	83
Tabela 5.9.Valores de penetração máxima do sinal Carvão 210 µm, areia (<180 µm), areia (180-250 µm) e balotina (<180 µm).....	84
Tabela 5.10.Valores de penetração máxima do sinal, calcário (<180 µm), RP (<180 µm), RP (180-250 µm) e RPNF (<180 µm).....	85
Tabela 5.11. Valores de penetração máxima do sinal do RPNF (180-250 µm), RPNF (médio), GPMMA (<180 µm) e GPMMA (180-250 µm).....	86
Tabela 5.12. Valores de penetração máxima do sinal do GPMMA (médio), PMMA (<180 µm) e PMMA (180-250 µm).....	87

Tabela 5.13. Valores de penetração máxima do sinal do e PMMA (médio).....	88
Tabela 5.14. Dados obtidos dos materiais quanto a velocidade de propagação, profundidade máxima de sinal e contraste.....	89
Tabela 5.15. Valores de velocidade de propagação nos materiais usando ultrassom de baixa frequência 250 kHz aplicado nos tanques de acrílico.....	91
Tabela 5.16. Dados obtidos dos materiais quanto a velocidade de propagação, profundidade máxima de sinal e contraste.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1. Descrição dos materiais e novos compósitos ensaiados.....	49
Quadro 4.2. Recipientes e instrumentos de medida empregados nos modelos físicos.....	51
Quadro 4.3. Parâmetros usados na aquisição das imagens para o cálculo da velocidade de propagação do som nos materiais.....	60
Quadro 4.4. Representação dos modelos físicos (com granulometria e espessura de materiais empregados) usados no teste de contraste com duas camadas sobrepostas.....	62
Quadro 4.5. Representação dos modelos físicos criados para análise do contraste, variando-se a granulometria e o tipo de material usando uma única camada de sedimento e dispostos “lado a lado”.....	62

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
μm	Micrômetro
B	Módulo de Bulk
c	Velocidade de propagação do som no meio
d	Diâmetro do transdutor
dB	Decibéis
D_t	Massa específica real da amostra
F	Comprimento da zona de Fresnel
g	Gramas
kg	Quilograma
kV	Quilo voltz
L	Litros
m	Metros
MHz	Mega Hertz
mL	Mililitro
mm	Milímetro
P_{max}	Profundidade máxima
R	Coeficiente de Reflexão
r	Raio do transdutor
s	Segundo
T	Coeficiente de Transmissão
t	Tempo de vôo
V_p	Velocidade de propagação do som no material
V_q	Velocidade de queda do material
$v_{\text{saparelho}}$	Velocidade de calibração do aparelho
v_{som}	Velocidade do som
x_{obj}	Dimensões de contorno do objeto
Z (Z_{nominal})	Espessura nominal do material
Z_{medido}	Espessura total do material
λ_{som}	Comprimento de onda sonora
ρ	Densidade do meio

RESUMO

GALL PIRES, Júlio César. **Análise do Desempenho da Ultrassonografia no Imageamento não Invasivo de Depósitos Sedimentares Simulados em Laboratório**. Porto Alegre. 2012. Anteprojeto de Mestrado em Engenharia de Materiais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Neste trabalho a aplicação de ondas acústicas para o imageamento de depósitos sedimentares produzidos em laboratório, com diferentes tipos de sedimentos, foi investigada sistematicamente. Para tanto, usou-se dois equipamentos de imageamento por ultrassom, um médico e um industrial, obtendo-se dois grupos de imagens. O equipamento médico ($1,0 < f < 10$ MHz) foi empregado para otimizar detalhes e o equipamento industrial ($0,1 < f < 1,0$ MHz) favorece a penetração em camadas mais espessas.

Foi avaliado o comportamento acústico (profundidade máxima do sinal, velocidade de propagação do som e contraste) de materiais tradicionais usados em simulações experimentais (carvão, areia e balotina) e de novos sedimentos artificiais, utilizando compósitos de base polimérica. Para análise dos materiais mencionados foram criados diferentes arranjos, onde se modificou a topografia, espessura das camadas e granulometria dos sedimentos. A frequência do transdutor e o tempo de sedimentação também foram controlados nos ensaios.

Os resultados obtidos mostraram que a profundidade máxima de visualização em 5 MHz não foi superior a 2cm para todos os materiais utilizados. Para uma frequência de 250 kHz a zona de visualização aumenta substancialmente para mais de 6 cm. Apesar da resolução espacial decrescer com a diminuição da frequência, devido ao aspecto pontilhado (*speckle*) das imagens ultrassonográficas dos depósitos, não se observa uma perda de detalhe significativa com o uso de frequências na faixa do kHz. A profundidade de visualização variou em função da granulometria do material sedimentado, sendo levemente maior em materiais com grãos maiores. Para granulometrias maiores que 180 μm , se obteve uma profundidade máxima de visualização da ordem de 1,27 cm para o carvão 210 e 1,10 cm para a areia. Enquanto que para os compósitos de base poliméricas da mesma faixa granulométrica se obteve valores em torno de 0,7 cm. Os materiais

com faixas menores que 180 μm ofereceram maior dificuldade à propagação do sinal do feixe, já que o feixe é refletido com grande eficiência.

Os cálculos de velocidade de propagação da onda ultrassônica nos materiais revelaram que ao se diminuir a granulometria a velocidade de propagação no sedimento aumenta levemente. O valor de velocidade de propagação do som estimado para o carvão 205 foi de 1989 ± 74 m/s, enquanto para o carvão 210 foi de 1705 ± 45 m/s. No calcário, areia, balotine, RP, RPNF, GPMMA e PMMA com granulometria menor que 180 μm a V_p foi da ordem de 1650 m/s. Não houve mudanças desses valores para as frequências utilizadas, como esperado, com exceção para a areia fina que em 250 kHz apresentou uma redução de ~ 20%. Não foram observadas diferenças muito significativas na intensidade do sinal sonoro entre os diversos materiais. Contudo, as morfologias esféricas do balotine ou arredondadas da areia proporcionaram sinais mais intensos e favorecem o contraste entre camadas quando materiais distintos, como o carvão ou os compósitos poliméricos são usados em camadas vizinhas. A granulometria também influencia no contraste, já que grãos maiores favorecem a reflexão difusa, enquanto a maior compactação de sedimentos de grãos menores cria condições mais favoráveis a reflexão quase especular de maior intensidade.

Os materiais convencionais empregados para o imageamento revelaram-se bons para o contraste como é o caso do balotine e da areia, mas o carvão e o calcário apresentaram-se muito reflexivos, além disso, outro ponto negativo é o tempo de sedimentação elevado ficando muito tempo em suspensão, o que impossibilita/prejudica seu emprego em testes visuais ou imageamento ultrassônico. Os materiais artificiais apresentaram pouca diferença de comportamento nos testes de imagem acústico, mas podem ser pigmentados para testes visuais em correntes de densidade e apresentam grandes variações de comportamento em imagens de raios x devido a mudanças nas concentrações de cargas adicionadas no momento da síntese.

No imageamento por ondas acústicas deve-se, contudo, levar em conta problemas como a reduzida profundidade de visualização para ecógrafos clínicos e a pequena área visual do transdutor, pois as imagens podem não servir para análise. Uma possibilidade para a aplicação dessa técnica é fazer imagens sucessivas do depósitos com incrementos de espessura baixos (da ordem de cm), com os mesmos parâmetros de aquisição. Assim cada camada de material pode ser

imageada independentemente e depois agrupada com base em pontos de referencias pré-estabelecidos. Então através do imageamento sequencial a reconstruir da arquitetura global do sedimento pode ser estudada.

Palavras-Chaves: Imageamento não invasivo, sedimentos, velocidade de propagação, ultrassom.

ABSTRACT

GALL PIRES, Júlio César. **Noninvasive imaging Ultrasonic Internal Architecture Deposits Sedimented in Tanks Hydraulic Simulation.** Porto Alegre. 2012. Master Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

In this study, the application of acoustic waves for imaging the internal architecture of sedimentary deposits produced in the simulation of different types of sediment tanks was investigated systematically. To do so we used two ultrasound imaging equipment medical and industrial, yielding two groups of images. The medical device ($1.0 < f < 10$ MHz) was employed to optimize detail and industrial equipment ($0.1 < f < 1.0$ MHz) favors the penetration in thicker layers .

The acoustic behavior (maximum depth of the signal propagation speed of sound and contrast) traditional materials used in experimental simulations (coal, sand and balotina) and new artificial sediments was studied using polymer-based composites. For analysis of such materials different arrangements which changed the topography, thickness and grain size of the sediment layers were created. The transducer frequency and settling time were also monitored in the trials.

The results showed that the maximum depth of view in 5 MHz was not more than 2 cm for all materials used. For a frequency of 250 kHz the display area increases substantially more than 6 cm. Although the spatial resolution decreases with decreasing frequency, due to the dotted aspect (speckle) of ultrasound images of the deposits isn't observed a significant loss of detail through the use of frequencies in the kHz range. The depth of view varied with particle size of pelleted material, being slightly higher in materials with larger grains. For particle sizes greater than 180 μm , there was obtained a maximum depth of view of the order of 1.27 cm to 1.10 cm coal 210 and to the sand. While for the polymer based composites of the same particle size range was obtained values around 0.7 cm. Materials with less than 180 μm tracks offered greater difficulty in spreading the signal beam, as the beam is reflected with high efficiency.

The calculations of the propagation speed of the ultrasonic wave in the material revealed that by decreasing the particle propagation velocity in the sediment increases slightly. The value of the sound propagation velocity estimated to the coal 205 was 1989 ± 74 m/s, while for coal 210 was 1705 ± 45 m/s. In limestone, sand,

balotine, RP , RPNF , GPMMA and PMMA particle size less than 180 μm was the V_p of the order of 1650 m/s . There were no changes of these values for the frequencies used, as expected, except for the fine sand at 250 kHz decreased by $\sim 20\%$. No significant differences were observed in the intensity of the sound signal between different materials. However, the spherical morphologies of balotine or rounded sand gave more intense signals and favor layers when the contrast between different materials, such as coal or polymer composites are used in neighboring layers. The particle size also influences the contrast, since larger grains favor the diffuse reflection, while the greater compaction of sediments smaller grains creates more favorable conditions almost specular reflection of greater intensity.

Conventional materials used for imaging proved to be good for contrast as in the case of balotine and sand , coal and limestone but had become very reflective Furthermore, another drawback is the time of getting very high settling time suspension, which prevents / impairs its use in visual tests or ultrasound imaging .

Artificial materials showed little difference in acoustic behavior of the test image but can be pigmented for visual tests in current density and have wide variations in behavior X-ray images due to changes in the concentrations of fillers added at the time of synthesis.

In imaging by acoustic waves should, however, take into account problems such as reduced depth preview for clinical echographs and small visual area of the transducer, because the images can't be used for analysis. One possibility for the application of this technique is to make successive images of the deposits in increments of low thickness (of the order of cm), with the same acquisition parameters. Thus each layer of material can be imaged independently and then grouped based on predetermined points of reference. Then through sequential imaging to reconstruct the global architecture of the sediment can be studied.

The research of the internal architecture of sedimentary deposits produced in physical models employing acoustic waves for imaging revealed by the observation of material characteristics can estimate the presence of the layers that constitute it. To do this, find differences substances as particle size, particle morphology, speed of acoustic propagation in the material and density are of great importance and facilitate the analysis of a sample.

Key-words: Noninvasive imaging, sediment, velocity of propagation, ultrasound.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos na área de geofísica buscam conhecer o planeta Terra a partir das medidas de suas propriedades físicas. São inúmeros os campos da ciência voltados para este propósito, cada um deles, relaciona um tipo de medida a uma propriedade física encontrada nos materiais. Alguns exemplos destas propriedades são: as diferentes velocidades de propagação do som nos meios materiais, a profundidade máxima que um pulso ultrassônico pode atingir em um material, a radioatividade natural dos elementos, os campos gravitacional, elétrico e magnético da terra, assim como, o fluxo de calor entre corpos com diferentes temperaturas [1].

Os estudos de fundos e subfundos oceânicos baseiam-se fortemente no uso de ondas acústicas, através da sísmica, da sonografia e da batimetria. Esses métodos de caracterização funcionam segundo os princípios da mecânica ondulatória. A transmissão, reflexão e espalhamento de ondas acústicas entre dois ou mais meios físicos de propriedades elásticas distintas, variam de maneiras diferentes de acordo com as propriedades da interface e permite a diferenciação de camadas. A coluna d'água e o número de camadas sedimentares também afetam os resultados obtidos [2].

A sísmica permite o estudo sobre a posição estrutural das camadas sedimentares abaixo do fundo marinho. Tornando possível avaliar parâmetros como espessura de camadas, presença de falhas, ocorrências de acúmulos de gás e deslizamentos submarinos [3].

Já a batimetria, fornece informações sobre as características morfológicas e sedimentológicas do fundo do oceano. Ela mostra contornos do relevo e a variação da distribuição superficial dos sedimentos. Além disso, em algumas condições, pode fornecer informações sobre a ação de correntes marinhas sobre os sedimentos. Os registros de batimetria são capazes ainda, de mostrar a presença de qualquer objeto sobre o fundo do mar com um navio, por exemplo [4].

Outros estudos baseados na observação de modelos criados em laboratório auxiliam análises de sistemas complexos de difícil observação natural, como os estudos de simulação de correntes de densidade conservativas e não conservativas. Esses estudos são de grande valia, de acordo com Kneller *et al* [5], essas correntes são os principais agentes transformadores de depósitos sedimentares em ambientes aluviais e marinhos profundos. Seu estudo é importante não somente pelo potencial risco ambiental causado por avalanches e tsunamis em acomodações geológicas, mas também devido à exploração de petróleo, onde o depósito sedimentar gerado por essas correntes pode constituir reservas de óleo e gás.

A análise de camadas sedimentares, formada por estas correntes, em menor escala, pode ser feita em tanques através da utilização de materiais misturados ao carvão mineral ou areia para formar depósitos sedimentares. Observações feitas a partir de dados coletados nas simulações sugerem que os diferentes materiais empregados nessa mistura depositam-se em diferentes camadas. A observação da disposição dessas camadas é feita de maneira cuidadosa através da coleta de testemunhos. Contudo, a análise de uma faixa mais extensa do depósito é prejudicada uma vez que o depósito precisa ser escavado para ser fotografado, com isso, o modelo é destruído inviabilizando novos estudos. Na tentativa de se aperfeiçoar maneiras de imageamento de depósitos sedimentares, de forma não invasiva, técnicas de imagem baseadas em ondas acústicas, são uma opção [6]. Em particular, procurou-se avaliar o desempenho de novos sedimentos artificiais a base de polímeros em comparação com materiais tradicionais como areia, carvão e calcário, já que o carvão e o calcário têm dificultado a visualização das diferentes camadas de sedimento, além de levar um grande tempo de acomodação, o que torna a água turva para visualização.

O imageamento por ultrassom apresenta a vantagem de ser não destrutivo, além de gerar um grande número de imagens em um curto intervalo de tempo em diferentes posições na amostra.

Este trabalho buscou desenvolver de maneira sistemática, uma metodologia capaz de comparar o desempenho da ultrassonografia no imageamento de depósitos sedimentares subaquáticos criados em laboratório, utilizando diversos materiais com diferentes tamanhos de grão e morfologias. Ele está organizado em 7 capítulos. No capítulo 3 são apresentados alguns fundamentos necessários para o bom entendimento das técnicas que empregam ondas acústicas para imageamento.

O capítulo 4 trata sobre a metodologia utilizada para a realização dos experimentos e os materiais que foram utilizados para a montagem dos modelos físicos. O capítulo 5 contempla os resultados obtidos e suas respectivas considerações. No capítulo 6 são discutidas as conclusões deste estudo e, por fim, no capítulo 7 as perspectivas futuras de trabalho.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é investigar o desempenho da ultrassonografia no imageamento não invasivo de depósitos sedimentares simulados em laboratório. Busca-se desta maneira, diferenciar substâncias de um sistema heterogêneo pela granulometria ou morfologia da partícula, visualizar interfaces existentes no encontro dessas camadas de sedimentos, além de se observar a profundidade máxima atingida pelo feixe ao longo de sua propagação em camadas homogêneas de cada material utilizado mudando a frequência de emissão da onda acústica.

2.1. Objetivos específicos

Propor e aperfeiçoar técnicas de imageamento segundo resolução, penetração, contraste e velocidade de propagação do sinal no material. Dessa forma são objetivos específicos desse trabalho:

- a) Determinar a profundidade máxima de imageamento em função do tipo de material sedimentado e frequência de emissão da onda acústica;
- b) Calcular a velocidade de propagação da onda ultrassônica nos materiais utilizados;
- c) Avaliar a capacidade de diferenciar substâncias pelo contraste e interfaces ecogênicas mudando a granulometria do material;
- d) Identificar os melhores parâmetros de imagem para cada um dos sistemas adotados. O estudo utilizou dois sistemas de imagem: um ultrassom clínico de alta frequência ($1,0 < f < 10$ MHz) e outro ultrassom industrial de baixa frequência ($0,1 < f < 1,0$ MHz). No primeiro caso, buscou-se um melhor grau de detalhamento das imagens, quanto à resolução e no segundo caso, pretendeu-se investigar a

profundidade máxima alcançada pelo sinal acústico nos materiais, as quais o equipamento clínico não alcança.

e) Avaliar o desempenho das imagens de novos compósitos sintéticos comparando com materiais tradicionais (carvão, balotina, areia e calcário).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Histórico

A descoberta do ultrassom ocorreu em 1794, quando Lazzaro Spallanzini demonstrou que os morcegos se orientavam mais pela audição do que pela visão, desviando assim dos obstáculos e localizando suas presas. Em 1880 Jacques e Pierre Curie deram uma contribuição importante para o estudo do ultrassom, quando descreveram características físicas de alguns cristais piezoelétricos.

Os estudos na área de ultrassom foram impulsionados com propósitos militares e industriais. Depois da Segunda Guerra Mundial, iniciaram-se as pesquisas sobre as aplicações do ultrassom na área médica com objetivo inicialmente terapêutico. O pioneiro nessa área foi o austríaco Karl Theodore Dussik em 1942, que utilizou ultrassom na detecção de tumores cerebrais, medindo a transmissão de ondas no interior do cérebro. O trabalho de Dussik influenciou vários pesquisadores, como Douglas Howry que, junto com W. Roderic Bliss construiu o primeiro sistema de ultrassonografia para fins médicos durante os anos de 1948 e 1949, produzindo a primeira imagem seccional em 1950 [7].

Atualmente, qualquer método de diagnóstico médico que emprega o ultrassom se baseia na transmissão, reflexão e espalhamento das ondas ultrassônicas. As imagens obtidas através dessa técnica podem ser usadas para medir e localizar o tamanho de estruturas envoltas em meio líquido, bem como avaliar o fluxo em tubulações ou em veias e artérias do corpo humano. Outra aplicação de imagens acústicas diz respeito à investigação de falhas ou trincas em peças para indústria, garantindo a confiabilidade nas linhas de montagem.

3.2. Características das Ondas Sonoras

O som pode ser explicado como uma propagação de energia por um meio material, através de sucessivas alterações de compressão e rarefação das partículas do meio. O que o ouvido humano detecta é a vibração provocada pela variação de pressão causada nas moléculas de ar, que acaba movimentado a membrana timpânica.

A essa mudança periódica de pressão dá-se o nome de frequência sonora. O ouvido humano é capaz de ouvir frequências que variam em torno de 20 a 20mil Hertz (ciclos por segundo). Tomando-se como referência o espectro audível do som, pode-se classificar as ondas acústicas como infrassom quando a frequência situa-se abaixo daquelas, que o ouvido humano pode captar e ultrassom, quando a frequência está acima da máxima, que o ouvido humano pode captar, conforme mostra a Figura 3.1.

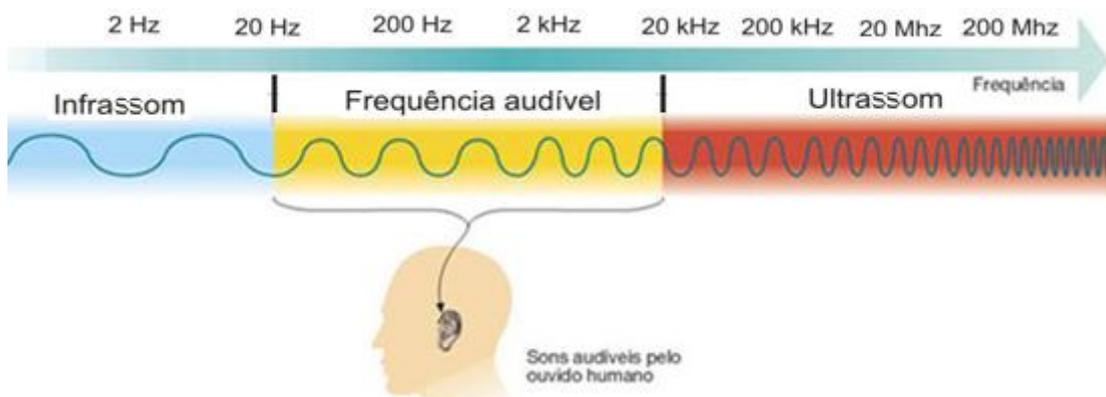


Figura 3.1. Representação do espectro acústico com os limites de referência [8]

Em aplicações de diagnóstico médico ou na análise de materiais, a frequência útil situa-se em valores elevados, da ordem de 20 mil a 10 milhões de ciclos por segundo, contudo em aplicações geológicas, que exigem alta penetração do feixe ultrassônico, o infrassom pode ser utilizado.

3.3. Propriedades Acústicas dos Materiais

A interação e propagação do som num dado meio dependem de algumas características do meio (propriedades acústicas). Por exemplo, a estrutura atômica e molecular do meio vai determinar tanto a velocidade quanto as características da

frente de onda transmitida e refletida. A seguir, são apresentadas algumas dessas propriedades das ondas acústicas.

3.3.1. Velocidade de Propagação [3]

A velocidade de propagação do som (c) depende da densidade e da rigidez do meio, mas, no geral, independe da frequência com que a onda se propaga. Materiais com partículas pesadas tendem a mover-se mais lentamente que um material com partículas mais leves para um mesmo valor pressão. Materiais altamente compressíveis, como os gases, apresentarão longas excursões de moléculas individualmente e transmitirão ondas de pressão mais lentamente. Portanto, variações da densidade ou da compressibilidade tendem a provocar alterações na propagação do som em fluidos. A velocidade de propagação está relacionada com a densidade do material da seguinte maneira:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (3.1)$$

onde, B é o chamado módulo de elasticidade ou módulo de Bulk do material e ρ é a densidade do tecido ou material.

Na Tabela 3.1, velocidades acústicas de alguns materiais são mostradas.

Tabela 3.1. Velocidade do som em tecidos biológicos, não biológicos e para a água, mostrados em azul, cinza e verde, respectivamente. Adaptado de [9].

Tecido biológico	Velocidade (m/s)	Material não biológico	Velocidade (m/s)	Temperatura da água (°C)	Velocidade (m/s)
Gordura (média)	1430	Ar (20°C, 10% umidade)	331	0	1403
Cérebro	1560	Acetona	1174	5	1427
Rim	1560	Etanol	1207	10	1447
Fígado	1570	Polietileno	1950	20	1481
Músculo (esquelético)	1575	Areia média	1555	30	1507
Sangue (totalidade)	1580	Areia fina	1635	40	1526
Vértebra	1585	Areia lamosa	1550	50	1541
Cristalino do olho	1620	Lama consolidada	1493	60	1552
Osso crânio (parte externa)	2800	Lama fluida	1530	70	1555
		Acrílico (Lucita)	2680	80	1555
		Ouro	3240	90	1550
		Cobre	3901	100	1543
		Chumbo	2160		
		Madeira (dura)	3960		
		Tijolo	4176		

3.3.2. Impedância Acústica Específica [10]

Outro fator importante na compreensão da transmissão e reflexão do som é a impedância acústica do meio, dada em $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$, esta propriedade é igual ao produto da densidade do meio (ρ), dada em $[\text{kg}/\text{m}^3]$, pela velocidade de propagação do som nesse meio (c), dada em $[\text{m}/\text{s}]$, conforme a expressão 3.2:

$$Z = \rho \cdot c \quad (3.2)$$

Para exemplificar, as Tabelas 3.2 e 3.3 mostram os valores de impedância acústica para alguns materiais incluindo tecidos do corpo humano. Quando uma onda incide numa interface acústica formada por dois meios de impedância acústica diferente, parte da energia é transmitida sob forma de uma onda de menor intensidade e outra parte é refletida como sinal (eco).

A fração de intensidade refletida é diretamente proporcional a diferença de impedância entre dois meios. A superfície de contato entre os dois meios denomina-se interface acústica. A relação que determina o coeficiente de reflexão é mostrada na Seção 3.4, equação 3.5.

Tabela 3.2. Valores das impedâncias acústicas para diferentes tecidos [11].

Tecido biológico	Impedância Acústica (kgm^2/s)
Sangue	$1,61 \times 10^6$
Fígado	$1,65 \times 10^6$
Músculo	$1,70 \times 10^6$
Gordura (média)	$1,38 \times 10^6$
Osso (típico)	$5,3 \times 10^6$
Água (20°C, 1atm)	$1,48 \times 10^6$
Ar (20°C, 10% umidade)	430

Tabela 3.3. Valores das impedâncias acústicas para diversos tipos de materiais [11].

Material não biológico	Impedância Acústica (kg m²/s)
Aço (em geral)	45,4x10 ⁶
Aço inoxidável	46,0x10 ⁶
Alumínio	17,33x10 ⁶
Ar	428,6
Borracha	1,56x10 ⁶
Borracha	1,55x10 ⁶
Borracha macia	1,0x10 ⁶
Cobre	41,6x10 ⁶
Ebonite	2,64x10 ⁶
Ferro	25,3x10 ⁶
Ferro fundido	33,2x10 ⁶
Isobutileno isopreno (IIR)	2,0x10 ⁶
Madeira Olmo	0,8x10 ⁶
Madeira Sobreiro	3,6 x10 ⁶
Poli(cloropreno) (CR)	2,1x10 ⁶
Poli(uretano) (PU)	1,38x10 ⁶
Silicone (RTV)	0,99x10 ⁶
Vidro	10,1x10 ⁶

3.3.3. Atenuação [12]

Um feixe sonoro sofre alterações progressivas ao longo de sua trajetória pelos materiais com os quais interage, sendo a diminuição da intensidade um dos fenômenos mais importantes dentro da ultrassonografia. Este decréscimo na intensidade do feixe é denominado atenuação.

Em ondas que se propagam em materiais existem perdas por atenuação devido a alguns fenômenos nos tecidos, como reflexão, absorção e espalhamento. A intensidade do som em função da espessura do meio pode ser dada a partir da expressão abaixo:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.4)$$

onde, μ é o coeficiente de atenuação e x a distância percorrida no meio. O coeficiente de atenuação é a taxa com que a intensidade de uma onda é reduzida ao interagir com algum material, é expresso em dB/cm. Nas Tabelas 3.4 e 3.5 são apresentados os coeficientes de atenuação médios para diferentes tecidos e materiais, na frequência de 1 MHz. A atenuação ocorre de forma diferente para os diversos matérias e tecidos.

Tabela 3.4. Coeficiente de atenuação médio para diversos tecidos a 1MHz.[11]

Tecido	Coeficiente de Atenuação (dB/cm)
Adiposo	0,6
Cérebro	0,6
Fígado	0,5
Rim	0,9
Coração	1,1
Osso	10,2
Ar	12,0
Pulmão	4,0
Músculo	1,0

Tabela 3.5. Coeficiente de atenuação médio para materiais não biológicos a 1MHz [11]

Material não biológico	Coeficiente de Atenuação (dB/cm)
Areia média	11,0
Areia fina	4,0
Areia lamosa	12,5
Lama consolidada	8,5
Lama fluida	4,0

O coeficiente de atenuação também depende da frequência do som. Devido à atenuação do ultrassom nos materiais ser dependente da frequência, a profundidade de penetração varia inversamente com o aumento da frequência.

3.4. Comportamento do Som em Interfaces Acústicas [13,14].

Ao encontrar uma interface acústica, a frente de onda produzida pelo feixe sonoro é dividida. Uma parte do som é refletida ou espalhada e a outra parte é

transmitida pelo material. Além disso, a onda pode ser refratada ou difratada dependendo das características da superfície (dimensões, granulometria, impedância, rugosidade, geometria, etc.). Os principais mecanismos de deflexão do feixe incidente em condições convencionais são: o espalhamento, a reflexão difusa e a reflexão especular.

A reflexão especular ocorre sempre que um feixe sonoro atinge uma fronteira entre dois materiais ou tecidos com diferentes impedâncias e o comprimento de onda sonora (λ_{som}) é muito menor que as dimensões de contorno do objeto x_{obj} ($\lambda_{\text{som}} \ll x_{\text{obj}}$). Quando o som se depara com objetos ou rugosidades da interface de dimensões que se aproximam do λ_{som} , ocorre principalmente o fenômeno chamado reflexão difusa. Para objetos ou grãos ainda menores ($\lambda_{\text{som}} \geq x_{\text{obj}}$) o espalhamento, em todas as direções predomina e o feixe é espalhado em várias direções, num certo intervalo angular.

O espalhamento é o redirecionamento da onda incidente em várias direções, por meios não homogêneos ou rugosos (grandes granulometrias). Normalmente a intensidade das ondas espalhadas é muito menor do que ondas refletidas especularmente. Dessa forma, a detecção de ondas refletidas depende do ângulo de incidência. O espalhamento permite, portanto, a detecção de interfaces que não estejam necessariamente perpendiculares à direção do som incidente. A reflexão difusa e o espalhamento os fenômenos mais significativos para a formação da imagem em ultrassonografia.

O ângulo de reflexão pode ser determinado através da Lei de Snell, que embora desenvolvida na pesquisa de fenômenos da Óptica, serve perfeitamente para a previsão do comportamento das ondas sonoras refletidas, já que tanto a luz quanto o som são fenômenos de caráter ondulatório.

Os coeficientes de reflexão (R) e transmissão (T) estão relacionados com os valores das intensidades das ondas ultrassônicas refletidas e transmitidas na interface, que por sua vez depende dos valores de impedância acústica de cada meio. Para incidência normal, esses coeficientes podem ser determinados pelas expressões abaixo.

$$R = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2 \quad (3.5)$$

$$T = \left[\frac{4Z_2 - Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \right] \quad (3.6)$$

Percebe-se através da expressão 3.5 que as diferenças de impedância acústica entre dois meios adjacentes determinam os graus de intensidade da transmissão e da reflexão do ultrassom. A intensidade dos ecos é diretamente proporcional à diferença de impedância acústica dos materiais que constituem a interface acústica.

3.5. Princípio de Funcionamento de um Equipamento de Ultrassom

Para a geração do feixe ultrassônico, pulsos elétricos de curta duração são aplicados em um dispositivo que possui características piezoelétricas. Esse dispositivo, chamado de transdutor é responsável por converter a energia elétrica em energia e mecânica e vice-versa. Para a geração do feixe ultrassônico, pulsos elétricos de curta duração são aplicados em um dispositivo que possui características piezoelétricas. Esse dispositivo, chamado de transdutor é responsável por converter a energia elétrica em energia e mecânica e vice-versa. O transdutor, geralmente, fica em contato acústico com o material em estudo, seja através de um gel para medidas de objetos secos, seja com imersão em água, o que facilita o acomplamento/combinção das impedâncias do transdutor com o meio em questão. Para a geração do feixe ultrassônico, pulsos elétricos de curta duração são aplicados em um dispositivo que possui características piezoelétricas. Esse dispositivo, chamado de transdutor é responsável por converter a energia elétrica em energia e mecânica e vice-versa [16].

As ondas geradas pelo transdutor propagam-se para o interior do modelo e interagem com o material, produzindo o espalhamento do feixe sempre que houver interfaces acústicas. Os ecos então são detectados por transdutores receptores em conjunto com o tempo de vôo do sinal. Assim, considerando-se conhecida a velocidade de propagação do ultrassom nos materiais ou nos tecidos é possível identificar os sinais recebidos em várias profundidades. De forma geral, a imagem, o mapeamento da intensidade de espalhamento ponto a ponto no material. Alguns ecógrafos podem corrigir a amplitude dos ecos, evitando perdas na imagem devido a

atenuação através do controle de ganho no tempo (TGC), que amplifica o sinal conforme o tempo de detecção [17].

Um equipamento simples de ultrassom é formado por uma unidade de geração e transmissão dos pulsos elétricos para excitação dos cristais piezoelétricos, uma unidade de recepção e amplificação dos sinais captados, uma unidade de controle e processamento que é utilizada para configurar os parâmetros das unidades de transmissão e recepção e uma unidade para visualização dos resultados do processamento. O tipo de análise e de processamento efetuados nos sinais enviados e recebidos pelos transdutores, depende do estudo proposto.

O equipamento de ultrassonografia pode operar em diferentes modos de visualização. O **modo amplitude**, conhecido como *Modo A*, compreende a forma mais simples de operação do equipamento. Neste caso, o aparelho possui um único cristal piezoelétrico, que emite pulsos ultrassônicos de curta duração e recebe os sinais produzidos pelas interfaces encontradas. A análise do objeto é feita a partir de um gráfico que mostra a amplitude em função da distância ou em função do tempo de vôo da onda. Cada estrutura onde o feixe é refletido gera um sinal, que fica registrado no gráfico [14, 15].

O *Modo A* é bem aceito para medir distâncias entre interfaces bem definidas, mas não gera uma imagem propriamente dita, apenas picos de amplitude. Uma vez que o ultrassom está calibrado com uma velocidade conhecida, a distância entre os picos de amplitude do sinal é medida através do produto entre a velocidade e o tempo decorrido entre os ecos registrados pelo aparelho, como mostra a Figura 3.2.

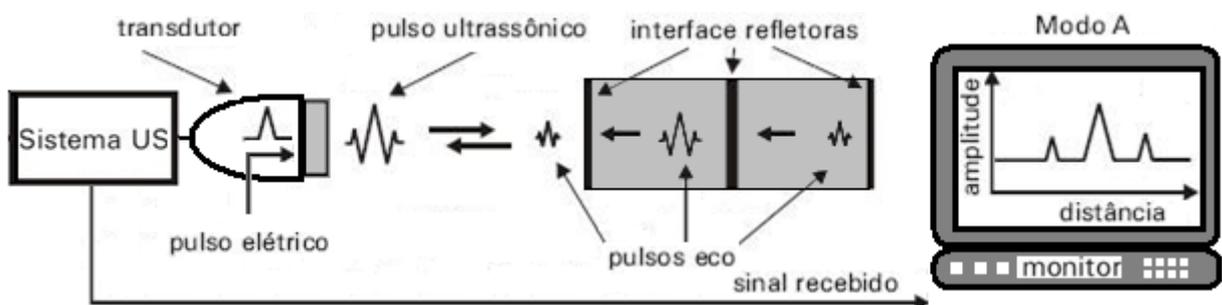


Figura 3.2. Esquema mostra o processo de aquisição do sinal no modo A.

O **modo brilho**, também chamado de *Modo B*, é obtido convertendo o sinal de intensidade eletrônico do *Modo A* em escala de cinza e realizando uma varredura do feixe ao longo de um plano de interesse. Nesse caso, o transdutor é constituído

por vários elementos piezoelétricos, que detectam os sinais refletidos de diversas regiões. Após o processamento dos sinais é possível visualizar a imagem na tela do equipamento em tempo real. Uma das vantagens obtidas através desse modo de operação é a semelhança morfológica com a região analisada [14,15]. Um esquema representativo do modo de obtenção da imagem pelo *Modo B* é mostrado a seguir, na Figura 3.3.

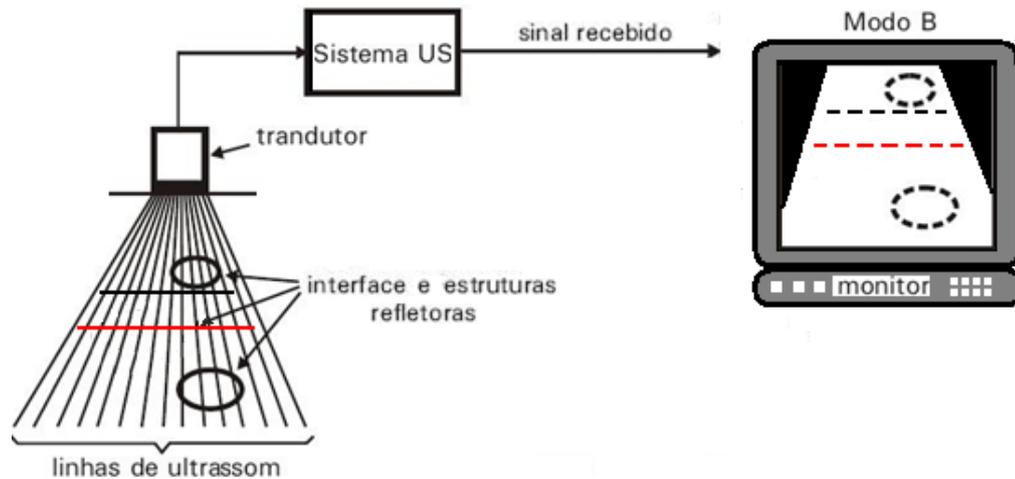


Figura 3.3. Esquema mostra sistema de obtenção de imagem de ultrassom no *Modo B*. Adaptado de [17].

3.5.1. Transdutor de Ultrassom e Materiais Piezoelétricos

Como já mencionado anteriormente, os transdutores de ultrassom são dispositivos construídos a partir de elementos piezoelétricos, um único elemento ou múltiplos elementos que transformam a energia mecânica ultrassônica em energia elétrica e vice-versa. O efeito piezoelétrico consiste na variação das dimensões de um material formado por redes cristalinas ao ser submetido a uma diferença de potencial [16]. Devido ao realinhamento das moléculas polarizadas, um movimento oscilatório é produzido nas paredes do cristal, dependendo da frequência de variação de tensão. Esse movimento de expansão e retração gera a formação de ondas mecânicas de ultrassom na mesma frequência do sinal de tensão de excitação. Os cristais piezoelétricos são capazes de responder fielmente à aplicação de sinais elétricos em altas frequências para produzir ondas ultrassônicas, sendo, da mesma forma, capazes de converter precisamente ondas ultrassônicas que recebem em sinais elétricos.

Os transdutores são construídos para trabalhar em uma frequência natural de máxima sensibilidade, chamada de frequência de ressonância, sendo essa frequência determinada pela espessura do cristal piezoelétrico. Quanto mais fino for cristal, mais alta será sua frequência de ressonância.

Na superfície por onde emergem as ondas ultrassônicas é adicionada uma camada especial, que permite o perfeito acoplamento acústico e oferece também proteção ao elemento piezoelétrico.

A Figura 3.4 mostra um desenho das partes integrantes de um transdutor. O transdutor é revestido externamente por um material plástico que condiciona o absorvedor acústico, o bloco de amortecimento, o cristal piezoelétrico e uma membrana de acoplamento. Todos esses elementos ficam envolvidos por uma capa metálica, que forma uma blindagem, conferindo uma boa resistência mecânica e garantindo a junção desses componentes. Um cabo coaxial liga os elementos do transdutor e leva o sinal para ser processado junto ao módulo eletrônico do equipamento.

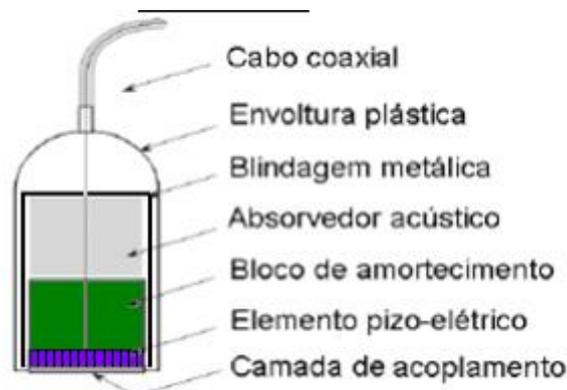


Figura 3.4. Esquema de um transdutor de ultrassom e seus componentes [11].

Os materiais piezoelétricos mais comuns são: o quartzo, a turmalina, o sal de Rochelle, o titanato de bário e o titanato zirconato de chumbo (PZT). Recentemente novas técnicas de construção de transdutores têm usado materiais compósitos a base de polímeros e outros materiais piezoelétricos.

Outra parte do transdutor de grande importância é a camada de material amortecedor, cuja função é atenuar de forma rápida a vibração do cristal, reduzindo drasticamente o comprimento do pulso de ultrassom. Quanto mais rígido é o amortecedor mais fortemente a vibração será atenuada.

A Figura 3.5 mostra uma curva de resposta de emissão típica de um transdutor de ultrassom em função da frequência. Nessa figura, são ilustradas duas curvas: a curva do transdutor não amortecido, que mostra a resposta do transdutor acentuada, em uma faixa específica de frequência e a curva de um transdutor amortecido, tornando a resposta do transdutor de banda larga no espaço de frequências.

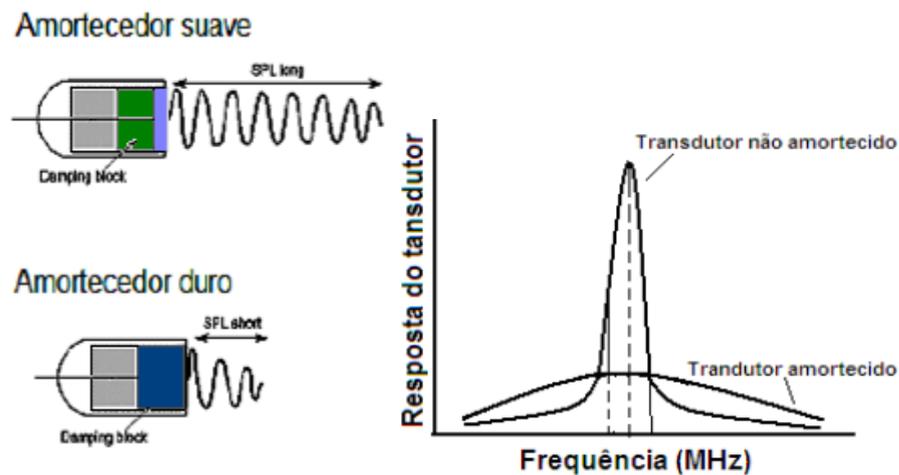


Figura 3.5. Curvas de frequência de transdutores com alto e baixo amortecimento [11].

Nos transdutores de baixa frequência, o revestimento protetor geralmente é composto por um material de alta densidade, altamente atenuante, sendo usado para controlar a vibração do transdutor. Quando as impedâncias acústicas do absorvedor e elemento pizoelétrico se ajustam, obtêm-se um transdutor fortemente amortecido, com grande banda de frequências e de menor amplitude. Contudo, se houver alguma diferença nas referidas impedâncias acústicas, uma maior quantidade de energia será refletida para além do ponto de interesse, resultando num transdutor com resolução mais baixa, ou seja, com pequena banda de frequência [16].

É possível operar o transdutor no modo de operação contínuo, quando uma oscilação elétrica constante é aplicada ao cristal do transdutor. Nesse caso, o cristal é dedicado exclusivamente à geração do feixe sonoro contínuo e um segundo cristal se torna necessário para detectar os ecos que retornam. O transdutor de um único elemento é usado para estudos em *Modo A* pulsado. Os transdutores de múltiplos elementos lineares são feitos com 32, 64 ou 128 elementos e são usados para obtenção de imagens bidimensionais em *Modo B* pulsado.

No que diz respeito à forma de transdutores eles podem ser classificados como setoriais, lineares ou convexos. Esta classificação varia de acordo com a forma do feixe ultrassônico.

Os transdutores setoriais podem ser eletrônicos ou mecânicos, diferentemente dos lineares e convexos que são somente eletrônicos. Os setoriais e os convexos dão origem a feixes sonoros divergentes em forma de leque, com maior campo de imagem, já os lineares produzem um feixe sonoro de linhas paralelas, dando origem a um campo de imagem retangular. Devido a este aumento do campo de imagem, o transdutor convexo pode gerar mais artefatos [16].

Além dos transdutores eletrônicos existem os físicos ou “*Phased Array*”, que modificam o formato do feixe por defasagem temporal na excitação dos diversos elementos do cristal. Estes transdutores, conseguem ajustar seu ponto focal e a direção de propagação do feixe, permitindo um melhor aproveitamento do feixe ultrassônico [17].

3.5.2. Geometria do Feixe Ultrassônico [19]

A forma do feixe ultrassônico será determinado pelas dimensões do transdutor, pela frequência utilizada e pela aplicação de lentes acústicas. Levando em consideração a dependência desses fatores é possível determinar qual transdutor será mais adequado para uma determinada situação.

O feixe de ultrassom pode ser estudado em três regiões diferentes, são elas: região focal, região convergente (zona de Fresnel ou proximal), e a região chamada zona de Fraunhofer ou distal, conforme a Figura 3.6. A região focal é onde ocorre a máxima convergência do feixe e encontra-se na transição entre as zonas de Fresnel e de Fraunhofer e corresponde ao local onde existe a máxima resolução lateral. A zona de Fresnel (região proximal) ou distância focal fica compreendida ao longo do eixo de propagação do feixe, essa região também é denominada profundidade de foco. O comprimento da zona de Fresnel pode ser determinado pela seguinte equação 3.7.

$$F = d^2 / 4\lambda = r^2 / \lambda \quad (3.7.)$$

onde, F é o comprimento da zona de Fresnel, r é o raio do transdutor, d é o diâmetro do transdutor e λ é o comprimento de onda do feixe.

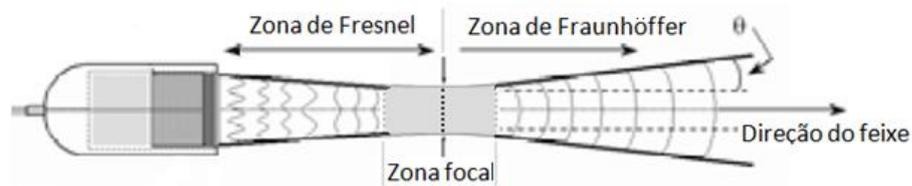


Figura 3.6. Representação da composição de um feixe ultrassônico [11].

3.5.3. Resolução da Imagem de Ultrassom [19]

A resolução espacial representa a capacidade do ecógrafo de diferenciar duas interfaces muito próximas uma da outra. Quanto menor é a distância entre as duas interfaces, que se conseguem resolver, maior será a resolução do ecógrafo. A resolução acústica espacial é dividida em resolução axial e resolução lateral.

A **resolução espacial axial** é determinada pela capacidade da imagem em separar duas estruturas posicionadas ao longo de eixo de propagação do feixe ultrassônico. Para se obter uma boa resolução axial é necessária a diferenciação dos dois ecos pelo receptor, sem haver a superposição. A Figura 3.7 mostra uma representação da origem do limite de resolução axial de um feixe de ultrassom. Na figura, temos a emissão de um pulso pelo transdutor e o eco resultante. As interfaces com separação menor do que a metade do comprimento espacial do pulso (SPL) não serão resolvidas pelo equipamento.

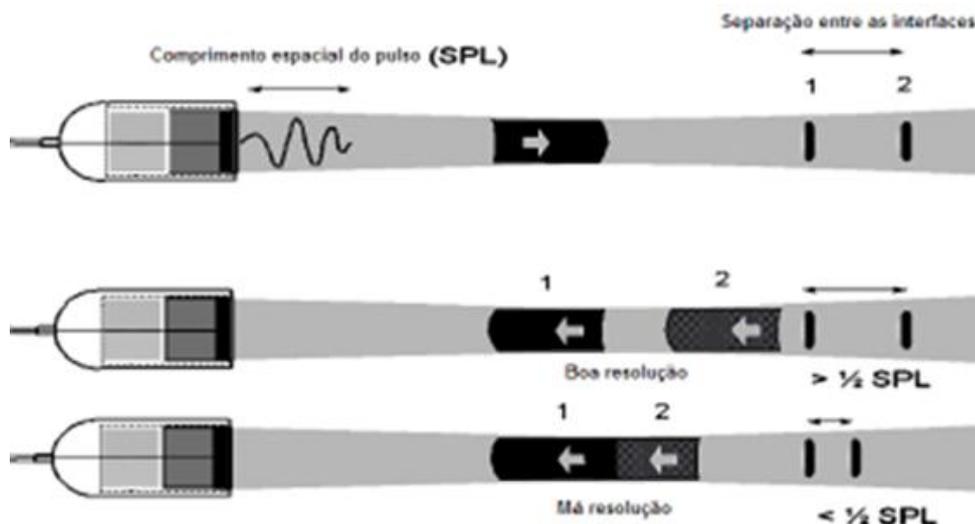


Figura 3.7. Representa como a resolução espacial axial é afetada pelo comprimento espacial da onda[11].

Uma forma de melhorar a resolução espacial axial é utilizando transdutores de alta frequência, ou seja, deve-se aplicar uma onda de menor comprimento espacial de pulso.

A **resolução espacial lateral** é a capacidade de diferenciação de duas interfaces acústicas dispostas perpendicularmente ao eixo do feixe de propagação do ultrassom. A resolução lateral é dependente da largura do feixe. O feixe ao se propagar pelo material encontra muitas interfaces localizadas lado a lado na mesma profundidade, se duas interfaces estão mais próximas do que a largura do feixe, ambas irão dar origem a um eco, ao mesmo tempo ou, por coincidência, com a mesma fase de um eco de outra região, e apenas um único eco será registrado no transdutor.

A Figura 3.8 mostra a implicação da resolução lateral na imagem. Os pontos 1 e 2 estão separados com uma distância maior que a largura do feixe, como podemos ver em a) e b), tendo como resultado ecos distintos de cada ponto. No entanto, quando os pontos estão muito próximos, numa distância menor do que a largura do feixe, duas reflexões ocorrerão, e como consequência, tem-se a formação de um único eco chegando ao transdutor, gerando uma imagem com baixa resolução espacial lateral. Outro fator que afeta a resolução lateral, pode ser a granulometria do material ou o ângulo de incidência e reflexão do feixe ultrassônico, causando registros errôneos do sinais recebido.

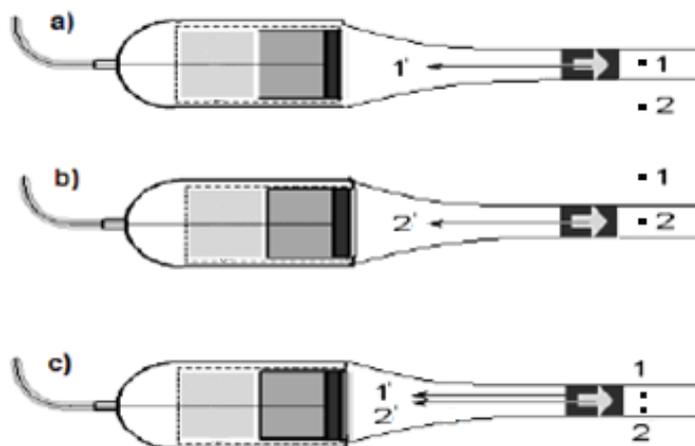


Figura 3.8. Representação dos efeitos da resolução lateral nos pontos 1 e 2 [11].

Para transdutores operando à mesma frequência, o de maior diâmetro apresentará um maior comprimento de zona proximal. Para um mesmo transdutor, quanto maior a frequência de operação, maior será o comprimento da zona proximal.

Outra característica importante que se deve levar em consideração é a presença da zona morta da imagem de ultrassom, que se configura como uma pequena parte da imagem na interface entre transdutor e tecido, que é saturada por reverberações múltiplas na interface devido a pulsos e ecos.

3.6. Correntes de Densidade e Simulações de Depósitos Sedimentares Analisados por Ondas Acústicas [20]

A corrente de densidade é um fluxo de partículas de materiais provenientes de processo erosivo do solo ou de rochas, que fluem misturados à água, pela ação diferencial da gravidade. Algumas correntes de densidade são também chamadas de turbidíticas por causa da carga sedimentar em suspensão. Embora existam diversos tipos de correntes de densidade, os registros geológicos revelam que somente dois desses processos, correntes de detritos e correntes de turbidez, são responsáveis pelo depósito de cerca de 90% de sedimentos de grãos maiores no fundo do mar [21]. Assim, a corrente de turbidez, que é tradicionalmente definida como sendo uma corrente de densidade induzida pela presença de material em suspensão, é um caso particular das correntes de densidade [21]. A existência de correntes turbidíticas foi proposta na década de 30 do século passado, nos anos 50, obtiveram-se evidências claras da sua existência em grandes profundidades [22]. Nas décadas de 60 e 70 constatou-se que os episódios turbidíticos eram bastante frequentes nas margens continentais e que grande parte da cobertura sedimentar existente nas planícies abissais foi constituída por turbiditos, que é uma denominação usada para rocha sedimentar formada.

Os materiais dissolvidos e suspensos no meio aquoso, ao formarem fluxos subaquáticos, possuem a densidade maior que o fluido circundante. Alguns fatores responsáveis pelo aumento da densidade, desse fluido, podem ser devido a menor temperatura, a maior salinidade e/ou a maior quantidade de matéria em suspensão, por essa razão também são chamadas de correntes de densidade. Esses fluxos causam modificações sedimentológicas e morfológicas no ambiente em sua volta e podem concentrar diferentes materiais em diferentes profundidades. As partículas

misturadas à água formam uma solução composta de água e sedimentos dispersos de muitas granulometrias e de diferentes materiais. As menores são mantidas em suspensão devido à turbulência do movimento e também podem ser dissolvidas dentro da corrente de sedimento. As partículas sedimentares maiores são depositadas em ordem decrescente segundo diâmetro e peso.

As correntes turbidíticas não se iniciam sem a existência de um mecanismo exógeno que faça com que grande quantidade de sedimento entre em suspensão, geralmente são provocadas por processos naturais como tempestades, avalanches subaquáticas, descarga de um rio no mar ou em outro rio, além de ocorrerem em desestabilizações da “pilha sedimentar”, que tanto pode ser provocada por fatores externos como abalos sísmicos ou quando seu perfil de equilíbrio é rompido.

As correntes de densidade podem ser divididas em dois grupos distintos: as correntes conservativas e as não-conservativas. As correntes conservativas são formadas por materiais dissolvidos dentro da corrente e, como exemplo, podemos citar as avalanches, onde encontramos argila e outros materiais dissolvidos e o movimento de massas de ar com diferentes temperaturas. Já as correntes não conservativas são formadas pelo material suspenso devido a movimentação de sedimentos. A água da chuva é um exemplo desse tipo de corrente, pois carrega sedimentos até bacias próximas, bem como, as tempestades ou os terremotos, que geram fluxos de materiais para dentro dos oceanos.

Inúmeros estudiosos como Middleton [24], Britter [25] e Gladstone [6] realizaram estudos sobre as correntes conservativas. Graças a eles foi possível observar os parâmetros geométricos e cinéticos dessas correntes por diversas maneiras, permitindo detalhar o comportamento e a separação de materiais com granulometrias diferentes.

Em relação aos possíveis riscos associados às correntes de turbidez, podemos citar, por exemplo, a sedimentação em reservatórios, o assoreamento de rios, o rompimento de cabos submarinos, tsunamis e avalanches []. Com a corrida pelo petróleo, os estudos voltaram-se para as correntes não-conservativas, devido ao fato desses sistemas serem um dos responsáveis pela formação de diversas bacias de hidrocarbonetos, que compõem vários dos maiores reservatórios do mineral no mundo [24, 27, 28]. Em um mesmo fluxo, grupos de partículas de diferentes tamanhos são geralmente mantidos em suspensão através de diferentes mecanismos de suporte. Dessa forma, o processo de sedimentação vai se

sucedendo à medida que a eficácia do mecanismo de suporte dos grãos muda em função da desaceleração do fluxo [29]. A sedimentação inicia geralmente com a deposição das partículas maiores, passando para a sedimentação de partículas menores e, por fim, a sedimentação do material que restaram em suspensão.

Uma maneira de estudar os efeitos das correntes de densidade é por meio de simulações físicas feitas baseadas na observação de depósitos sedimentares naturais por meio de testemunhos e afloramentos.

Modelos físicos experimentais podem ser formados pela deposição de várias camadas de diferentes tamanhos de grãos de material, depositados por correntes de turbidez não-conservativas. A visualização dessas camadas pode ocorrer, por exemplo, através de ondas ultrassônicas, capaz de gerar informações, que podem revelar qual é o material existente nas camadas sedimentológicas analisadas por analogia de imagens. A Seção 5.7 mostra respostas e testes de diferença de contraste entre os materiais capazes de serem percebidos pelo método.

3.7. Uso de Ultrassom no Imageamento de Depósitos Sedimentares

Pesquisas na área de imageamento geofísico de depósitos sedimentares estão em contínuo crescimento. A grande procura por novas técnicas, que permitam a identificação de áreas de exploração de minerais propulsionam as linhas de pesquisa da geofísica [30,31]. Técnicas de imageamento, que empregam ondas acústicas em frequências de ultrassom tem a vantagem de serem não invasivas, o que contribui na preservação da amostra, sem contar que são totalmente limpa e não causam nenhum dano ao meio ambiente. Uma vez criadas, as imagens podem revelar características particulares sobre os materiais observados, sendo possível mensurar a espessura da camada de cada material sedimentado, a velocidade de propagação do ultrassom nesse material, a penetração máxima do feixe de ultrassom e diferenciar o contraste das imagens (modo B) e o poder reflexivo do material em uma análise qualitativa torna-se possível.

Propriedades físicas de materiais e sedimentos estão diretamente ligadas as propriedades sedimentológicas da região. Algumas propriedades como: granulometria, porosidade, densidade, velocidade de queda (V_q) e velocidade de propagação no material (V_p), podem fornecer pistas para revelar a composição das camadas do depósito. Por exemplo, a velocidade de propagação, o coeficiente de

atenuação e a caracterização do sedimento são parâmetros bem aceitos para análise de modelagem geoacústica de um depósito sedimentar [1]. Alguns trabalhos [30, 32, 33] mostram correlações entre os valores de velocidade de propagação, densidade, porosidade e granulometria, além do teor de água, demonstrando diferentes relações que podem ser obtidas através deles. Um ponto importante, é que uma técnica ao ser usada isolada não pode fornecer evidências inequívocas sobre as características dos sedimentos, já que, em alguns casos, alguns respondem ao meio em que estão inseridos, enquanto outros correspondem mais fielmente a suas características intrínsecas.

A importância das características já mencionadas, como velocidade de propagação, a atenuação da onda compressional e a caracterização do tipo de sedimento, são parâmetros, entre outros, fundamentais à modelagem geoacústica do ambiente marinho [2, 34, 35, 37]. Os resultados obtidos a partir de tais modelos podem ser amplamente aplicados em atividades relacionadas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os itens a seguir descrevem as condições, os materiais e objetos empregados, os equipamentos utilizados e a metodologia adotada nesse trabalho.

4.1. Materiais Empregados

Nos experimentos foram empregados materiais convencionais, usados em simulações hidráulicas (carvão, pó de quartzo, calcário e microesferas de vidro) e materiais sintéticos à base de compósitos de matriz polimérica. Esses materiais estão brevemente descritos no Quadro 4.1.

Os novos compósitos empregados foram sintetizados em outro subprojeto realizado, que pode ser visto com maiores detalhes em [38]. A verificação das propriedades acústicas desses materiais e de materiais convencionais para montar modelos físicos de depósitos sedimentares usando ultrassonografia foi o foco desse trabalho.

Quadro 4.1. Descrição dos materiais e novos compósitos ensaiados.

Carvão mineral	Rocha sedimentar combustível, de cor preta ou marrom, que ocorre em estratos chamados camadas de carvão. É composto basicamente por carbono, mas contém quantidades variáveis de enxofre, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio.
Calcário	Rocha sedimentar que contém minerais com quantidades acima de 30% de carbonato de cálcio, substância química de fórmula CaCO_3 , que tem características alcalinas, ou seja, é um sal que aumenta pH de uma solução aquosa.
Pó de quartzo (areia)	A composição da areia é altamente variável, dependendo da rocha-fonte e das condições locais. O constituinte mais comum da areia em ambientes continentais interiores e em ambientes costeiros não tropicais é a sílica (dióxido de silício - SiO_2), usualmente na forma de quartzo, o qual, devido a sua inércia química e elevada dureza, é o mais comum dos minerais encontrados no solo.
Microesferas de vidro (balotine)	São partículas de vidro de formato perfeitamente redondas. O vidro é basicamente feito por areia, calcário, carbonato de sódio - Na_2CO_3 , e alumina.
Resina poliéster pura (RP)	Poliéster é uma categoria de polímeros que contém o grupo funcional éster na sua cadeia principal. Na reação com o catalizador, o poliéster reage com o monômero de estireno e dá origem ao polímero com alta rigidez.
Resina poliéster com negro de fumo (RPNF)	É o mesmo polímero, descrito anteriormente, sendo que, nesse caso, acrescentou-se uma carga denominada negro de fumo (um pó muito fino rico em carbono).
Poli(metilmetacrilato) (PMMA)	É um polímero acrílico de adição, formado pela união de sucessivas moléculas do monômero metil metacrilato. A reação dessa base polimérica com o catalisador dá origem a uma massa rígida que caracteriza a polimerização.
Poli(metilmetacrilato) com grafite (GPMMA)	É o mesmo polímero, descrito anteriormente, sendo que, nesse caso, acrescentou-se nano lâminas de grafite como carga.

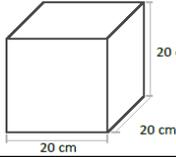
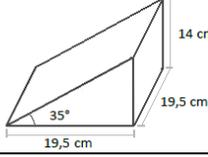
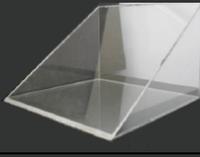
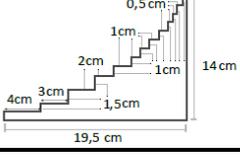
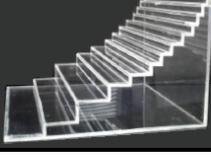
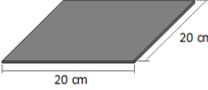
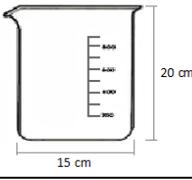
Algumas características de cada material como massa específica, faixa granulométrica e velocidade de queda foram determinadas para verificar a adequação dos materiais em experimentos de sedimentação. Outro aspecto foi a massa específica, que deve ser um pouco maior que a da água ($1,0 \text{ g/cm}^3$), assim não haveria a necessidade de se aplicar um agente de atividade superficial (surfactante) para facilitar a sedimentação. A velocidade de queda também foi

observada com a intenção de usar materiais que não ficassem muito tempo suspensos na água, pois isso contribui negativamente para qualidade da imagem, já que parte do sinal emitido é refletido pelo material em suspensão e não pelo sedimento acumulado no fundo do recipiente. O Quadro 5.2 da Seção 5.1 apresenta os valores dessas grandezas de maneira mais detalhada.

4.2. Tanques e Objetos de Teste

Para montagem dos modelos foi necessário a confecção de recipientes com dimensões suficientes para minimizar artefatos de borda nas imagens dos sedimentos realizadas com os ecógrafos. Com a intenção de avaliar a penetração máxima do sinal e a topografia do fundo dos modelos em um mesmo recipiente, criou-se estruturas em forma de plano inclinado e de degraus. Essas estruturas são removíveis de modo a propiciar um maior aproveitamento dos tanques. O material empregado na fabricação desses acessórios foram chapas de acrílico transparente de 6,0 mm de espessura, que garantem maior resistência mecânica e possibilitam visualizar e fazer medidas nominais cabíveis nos modelos sedimentológicos. Os diversos recipientes usados na montagem dos modelos físicos são apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2. Recipientes e instrumentos de medida empregados nos modelos físicos.

Nº	Geometria do Phantom	Características Técnicas		Imagem Técnica	Imagem
		Dimensões:			
01	Aquário cúbico	Dimensões:	20x20x20 cm		
		Espessura:	0,6 cm		
		Menor ângulo:	-		
		Material:	Acrílico		
02	Plano inclinado	Dimensões:	19,5x19,5x14 cm		
		Espessura:	1,6 cm		
		Menor ângulo:	35°		
		Material:	Acrílico		
03	Degraus ocios	Dimensões:	Conforme imagem ao lado		
		Espessura:	0,3 cm		
		Menor ângulo:	-		
		Material:	Acrílico		
Nº	Geometria do Phantom	Características Técnicas		Imagem Técnica	Imagem
04	Placa de zinco	Dimensões:	20 cm x 20 cm		
		Espessura:	2,0 mm		
		Material:	Zinco		
05	Béquer de vidro	Dimensões:	15 cm x 20 cm		
		Espessura:	3,0 mm		
		Material:	vidro		
06	Paquímetro	Dimensões:	0 - 150 mm		
		Precisão:	0,02 mm		
		Material:	Aço inox		

4.3. Ecógrafos

Nesse trabalho, investigou-se o imageamento de depósitos sedimentares em modelos experimentais, através de dois tipos de equipamentos de ultrassom: um ultrassom clínico e um construído para estudos geofísicos. Em geral transdutores clínicos operam com frequência central ou de ressonância em torno de 1,0 a 10 MHz e transdutores tipo industriais, de baixa frequência, na faixa de 0,1 a 1,0 MHz.

As imagens adquiridas com o ultrassom clínico, por trabalhar com transdutores de alta frequência, permitem um melhor grau de detalhamento dos objetos devido a melhor resolução lateral e axial. Já o ultrassom industrial, de baixa frequência, permite investigar interfaces e o comportamento do sinal em materiais

com espessuras maiores, com condições mais próximas das utilizadas em simulações hidráulicas.

O equipamento utilizado para a aquisição das imagens em *Modo B* foi um ecógrafo da marca *Siemens* modelo *Sonoline 7,5 L* (Fig. 4.1) com transdutor linear multi-frequencial (5,0; 7,5 e 9,0 MHz) pertencente ao Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD) de Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Nesse caso, no console do aparelho existem dispositivos para controlar e/ou modificar parâmetros que auxiliam na obtenção de uma boa imagem de diagnóstico médico. Alguns desses dispositivos ajustam a compensação de ganho temporal (TGC), a frequência empregada, o foco e o ganho da imagem.



Figura 4.1. Fotografia de um ecógrafo da marca *Siemens* modelo *Sonoline 7,5 L*.

O sistema ultrassônico para modelos geofísicos, trata-se de um equipamento capaz de armazenar dados e processá-los para formar imagens estratigráficas, instalado no Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo -LENEP/RJ, da Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF [39]. O equipamento foi desenvolvido com a finalidade de simular levantamentos sísmicos em modelos geológicos reduzidos. Os dados aparecem numa forma mais crua, no *Modo A*, isto é, em amplitude de onda. A “imagem” é formada por registros sucessivos do empilhamento de uma quantidade definida de pulsos (tiros), separados por um deslocamento (passo) dos transdutores (fonte/receptor) ao longo de uma dada linha de visão ao longo da amostra. Tal equipamento utiliza uma fonte emissora de ultrassom e um receptor de sinal, separados por 4,0 cm (*offset*), no mínimo. O emissor e receptor podem mover-se independentemente um do outro. A tensão,

assim como as frequências de excitação do transdutor podem ser reguladas dentro de uma faixa de 0,1 a 1,0 MHz.

O equipamento consiste de numa estrutura de duro alumínio, onde braços de sustentação e hastes são ligados à parafusos que funcionam como eixos de posicionamento, onde seis motores de passo controlam o deslocamento a partir de um computador. Cada motor de passo pode combinar movimentos independentes para cada um dos transdutores, e simular diferentes geometrias de aquisição, conforme mostra a Figura 4.2 a). Dois transdutores, um transmissor e um receptor são controlados em três dimensões (x, y e z), Figura 4.2 b).

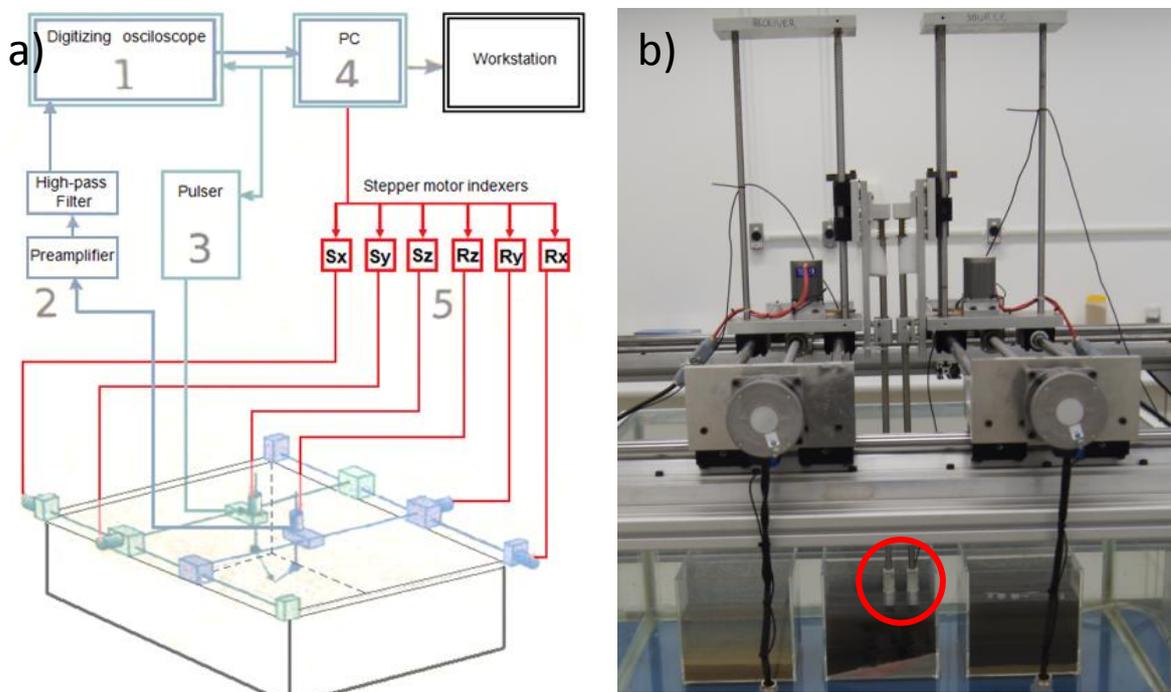


Figura 4.2.a) Representação esquemática do sistema ultrassônico de baixa frequência usado no LENEP, onde 1 é o digitalizador do sinal de recepção, 2 é o pré amplificador e o filtro passa alta, 3 é o emissor de sinal, 4 é a central de armazenamento e controle dos motores de passo em 5. b) Fotografia do equipamento mostrando no detalhe em vermelho os transdutores (emissor e receptor) nos modelos, bem como motores e guias de movimentação.

A sincronização entre o conjunto transmissor (pulsador e transdutor) e o conjunto receptor (transdutor e digitalizador) é feita através de uma placa de temporização. O conjunto transmissor emite um sinal ultrassônico, que se propaga através do modelo, até que a frente de onda refletida alcance o transdutor receptor. O sinal elétrico gerado no receptor é amplificado, digitalizado e armazenado de maneira similar ao registro da sísmica em escala de campo.

O equipamento conta com o software *Lab View* de aquisição de dados que auxilia no controle dos instrumentos. Esse software é programável e desenvolvido sobre uma série de janelas responsáveis pelos instrumentos citados anteriormente, que permite configurar os parâmetros necessários para execução de um experimento. As configurações podem ser modificadas para mudar a geometria, modificar o sinal e criar novos parâmetros de aquisição.

A forma de onda do pulso pode ser escolhida dentro de algumas opções como onda senoidal, onda quadrada e dente de serra. Além disso, o software permite configurar os parâmetros de aquisição do sinal, tais como; comprimento da janela de tempo, a amostragem temporal do sinal e o tempo de espera entre as aquisições. Também é possível configurar o número de tiros numa mesma posição e acumular suas amplitudes. Os dados adquiridos são gravados em arquivos no formato Seismic Unix-CWP (SU), além de outros.

4.4. Procedimento de Medida e Aquisição de Imagens

As imagens com o ecógrafo clínico, inicialmente, foram adquiridas a partir das amostras sedimentadas, construídas em béqueres de vidro de 1000 mL com diâmetro de aproximadamente 15 cm. A água foi o meio interpolador entre o transdutor e a camada de material sedimentado.

Os modelos foram montados, depositando-se nos recipientes uma mistura do material com água. Para análise dos materiais mencionados foram criados diferentes arranjos, onde se modificou a topografia da superfície dos materiais, a espessura e a granulometria como será detalhado nas seções seguintes. Na preparação das amostras foram usados novos materiais (nanocompósitos) com diferentes características físico-químicas visando a formação e combinação de camadas diferenciadas.

Antes das medidas, se esperou a sedimentação de cada camada para reduzir a quantidade de partículas em suspensão, minimizar erros de medida nas espessuras de sedimento e para contribuir na uniformidade das interfaces, o que aumenta a qualidade da visualização das subcamadas.

Para realçar a qualidade das imagens foram definidas pré-configurações de parâmetros ecográficos tais como brilho, contraste, ajuste de compensação de ganho no tempo (TGC), entre outros. O comportamento hiperecogênico das

interfaces e hipocogênico de alguns materiais, também foram observados com a intenção de diferenciá-los através do contraste. Foram utilizadas três das frequências (5,0, 7,5 e 9,0 MHz) disponíveis pelo aparelho, para o transdutor linear.

Nos testes foram analisadas algumas das características acústicas, tais como a velocidade de propagação sonora, profundidade máxima de penetração e diferenças de contraste entre materiais. Além disso, também foi avaliado a capacidade de diferenciar a topografia da superfície do modelo físico.

Levou-se em consideração a distância entre o transdutor e as bordas do béquer de forma a limitar o surgimento de artefatos. Isso ocorria quando se aproximava o transdutor da parede do recipiente gerando alta reflexão do sinal de ultrassom, como é observado nas indicações A e A' da Figura 4.3 durante o uso de um béquer. Em função disso foram usados recipientes com pelo menos 15 cm de diâmetro.



Figura 4.3. Imagem de artefato de bordas num béquer de diâmetro 10 cm com amostra de sedimento e água. A região em forma de "V" mostra o artefato (A - A').

As imagens adquiridas com o equipamento de ultrassom de baixa frequência, do LENEP/RJ, visaram analisar as propriedades acústicas em modelos com profundidade (espessuras) maiores de material, uma vez, que a frequência desse equipamento é menor que a do ecógrafo clínico.

Durante o funcionamento, em seu processo de aquisição, o aparelho faz inúmeros disparos (tiros) em um mesmo ponto sem alterar a tensão e a frequência e executa avanços (passo) de 1,0 a 2,0 mm em cada sequência de disparos.

Para a criação dos modelos, a deposição dos materiais foi realizada utilizando tanques cúbicos de acrílico transparente com arestas de 20 cm. Os tanques foram divididos pela metade, permitindo montar duas amostras em cada tanque. Também foram montadas amostras contendo duas camadas de material cada uma com 2,0 cm de espessura em três béqueres de 1 litro.

Os dados apresentados para os tanques são o resultado do empilhamento de 200 disparos acumulados em uma das 50 posições de disparo, que no caso, distam 2,0 mm em toda a distância varrida. Um gráfico de amplitudes versus tempo de vô pode ser interpretado como sendo a imagem, onde todas as sequências de disparos são mostradas juntas, permitindo a visualização do arranjo de estratos do modelo. As regiões de superposição de amplitudes dos empilhamentos são mostradas como cristas e vales pretos e indicam as interfaces existentes, assim, podem ser identificadas diferentes interfaces dos materiais.

Posteriormente foram realizados testes com duas e três camadas de materiais distintos, nos quais o segundo e o terceiro material foram inseridos cuidadosamente para evitar a mistura entre os compósitos e garantindo a formação de uma interface plana bem definida. As camadas de sedimento simulam levantamentos subaquáticos e depósitos sedimentares de bacias naturais.

4.4.1. Medidas de Tempo de Sedimentação dos Materiais

Durante a preparação dos modelos, devido a diferença na velocidade de queda dos materiais, alguns ficavam muito tempo suspensos na água, isso dificultava não somente o imageamento, como também as medidas nominais de espessura. Isso é particularmente marcante para o carvão, assim, foi realizada uma observação em relação ao tempo de sedimentação que esses materiais levavam até estabilizarem no fundo do recipiente. Usou-se para isso um conjunto de três provetas de volumes e diâmetros diferentes, que foram preenchidas com três colunas diferentes de água, com a intenção de observar o efeito da altura da coluna de água no tempo de sedimentação, Figura 4.4.

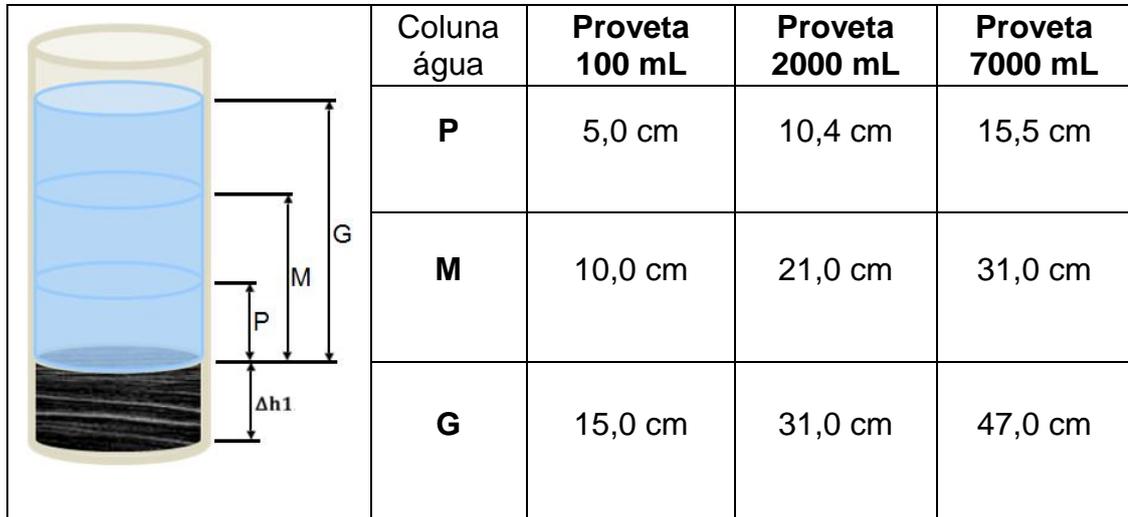


Figura 4.4. Representação da proveta com carvão sedimentado (Δh_1) e colunas de água pequena (P), média (M) e grande (G).

Nessas medidas, uma amostra de carvão (material com baixo tempo de queda) foi inserida nas provetas e misturada em água. A massa da amostra de carvão foi mantida constante, em cada proveta, e três colunas d'água de alturas distintas foram testadas. O sistema foi levemente agitado para que o material não entrasse em um equilíbrio metaestável (comportamento observado durante a sedimentação, quando não havia nenhum tipo de perturbação no sistema), ver Seção 5.2 sobre dinâmica de sedimentação.

4.4.2. Profundidade Máxima de Visualização

As medidas de profundidade máxima de visualização $P_{m\acute{a}x}$ do sinal acústico indicam a profundidade alcançada, na qual o feixe ultrassônico espalhado ainda pode ser distinguido do ruído. Para as medidas, um conjunto de três (3) béqueres de 1000 mL foram usados para análise de diferentes configurações de sedimentos homogêneos. As amostras foram preparadas em água, onde eram misturadas e colocadas para sedimentar. A análise dos materiais foi realizada após a sedimentação de, no mínimo, 30 horas. O posicionamento perpendicular do transdutor em relação à superfície do material auxiliou na redução da dispersão do

signal e possibilitou visualizar o fundo dos recipientes, fator importante para o cálculo da velocidade de propagação discutida a seguir.

Em todas as aquisições de imagem, o controle de ganho temporal (TGC), não foi corrigido para evitar resultados de penetração modificados pela eletrônica do equipamento. As imagens nos diferentes materiais ensaiados (carvão, calcário, areia, balotina e compósito), foram analisados no software *ImageJ* de modo a determinar-se o ponto de profundidade máxima de visualização.

Na Figura 4.5 em a) é possível ver uma imagem adquirida a partir de uma amostra de carvão com transdutor linear na frequência de 7,5 MHz. A linha amarela, em destaque indica a posição de onde se obteve o perfil mostrado na Figura 4.5 b). O perfil (obtido com o software *ImageJ*) relaciona a intensidade do sinal (tons de cinza) com a distância percorrida pelo som no material. A distância, na qual o sinal do material atinge o nível de ruído (região onde a variação dos tons de cinza oscilam com intensidade próximas) foi considerado o valor da profundidade máxima de visualização.

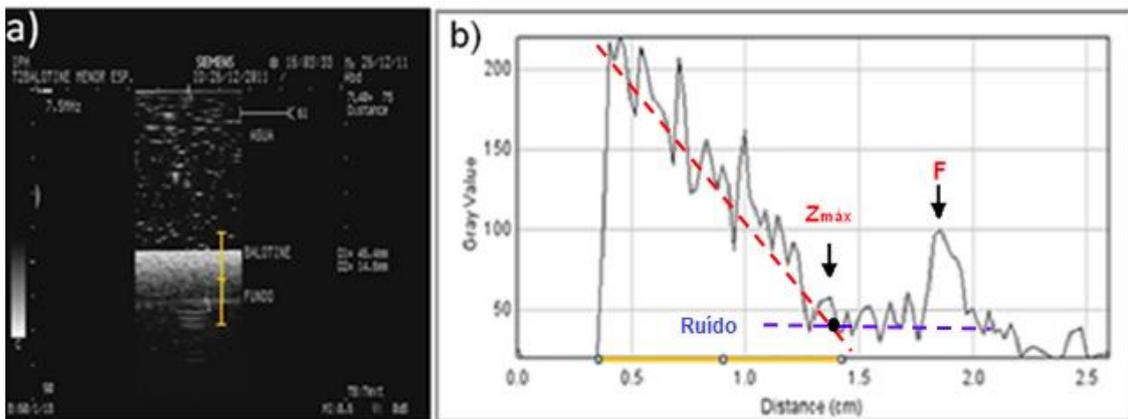


Figura 4.5. Em a) é mostrada a imagem ecográfica feita a partir do material balotina sedimentado em um béquer; em b) o gráfico do perfil, intensidade por distância, gerado pelo software *ImageJ*. O fundo do modelo aparece no pico indicado pela letra “F”, já a profundidade máxima do sinal por “Z_{máx}”.

A profundidade máxima de visualização também foi obtida encontrando a espessura de material a partir da qual o tamanho da camada visualizada pelo ultrassom não aumenta com o aumento a espessura nominal da camada, conforme mostra a Figura 4.6.

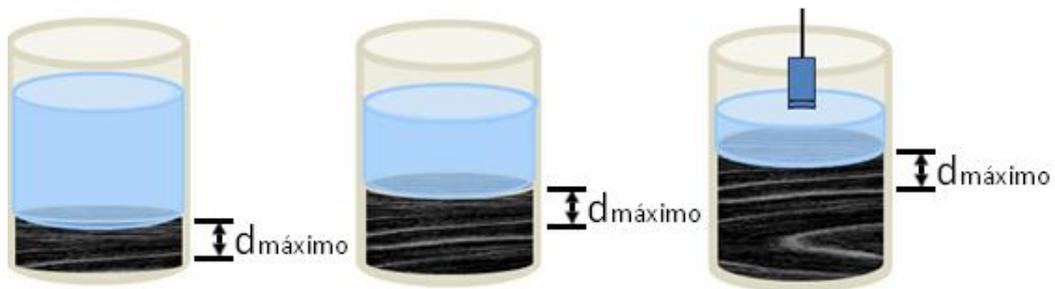


Figura 4.6. Penetração máxima do sinal em três espessuras de sedimento.

Como o equipamento de ultrassom clínico é setado com uma velocidade ultrassônica de 1540 m/s, posteriormente, os valores de velocidades de propagação dos materiais foram usados para corrigir os valores de penetração máxima dos materiais com velocidade de propagação diferentes da velocidade do aparelho.

4.4.3. Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas em Materiais Sedimentados

A determinação da velocidade do sinal sobre a amostra foi realizada diretamente através de equações mostradas abaixo. Cabe lembrar a importância de se obter imagens que mostrem o fundo do modelo. A velocidade de propagação ultrassônica v_{som} é dada por:

$$v_{som} = \frac{2Z}{t} \quad (4.1)$$

onde, t é o tempo de vôo do som no material (ida e volta) e Z é a espessura nominal de material sedimentado. Uma vez que a imagem gerada no ecógrafo baseia-se no tempo de vôo da frente de onda ultrassônica refletida para o transdutor e que o aparelho é setado com uma velocidade constante de 1540 m/s, no equipamento medimos Z_{medido} , já que:

$$v_{s_{aparelho}} = \frac{2Z_{medido}}{t} \quad (4.2)$$

$$1540 = \frac{2Z_{medido}}{t} \quad (4.3)$$

onde, t é o tempo de vôo do som no material e Z_{medido} é a espessura total de material medido na imagem ecográfica.

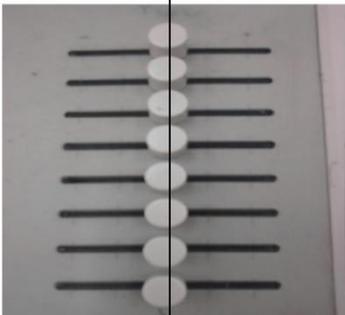
A velocidade propagação ultrassônica no material pode ser obtida a partir da substituição do tempo de vôo obtido pela equação 4.3 na equação 4.1.

$$v_{som} = \frac{Z}{Z_{medido}} 1540 \quad (4.4)$$

Mediu-se também a altura da coluna de água entre o transdutor e o material, de onde se pôde avaliar a velocidade de propagação do som na água. Esses valores foram usados para avaliar possíveis erros intrínsecos ao método utilizado.

Os parâmetros usados no ecógrafo bem como o tipo de transdutor utilizado, são apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3. Parâmetros usados na aquisição das imagens para o cálculo da velocidade de propagação do som nos materiais.

Transdutor Linear - 7.5L40	Siemens Sonoline	Material:	Carvão
Configurações do ultrassom:			
Frequência do Transdutor: 5,0MHz			
Preset: Abd			
(B) Ganho: 18 dB			
Gray Map: L			
Persist: 3			
Density: Standart			
Edge: 1			
Foco: 1			

Para calcular as velocidades de propagação das ondas acústicas nos diferentes materiais, foram depositadas três espessuras diferentes de um mesmo material, uma em cada béquer.

A Figura 4.7 mostra uma representação dos modelos produzidos para cada material e granulometria estudada.

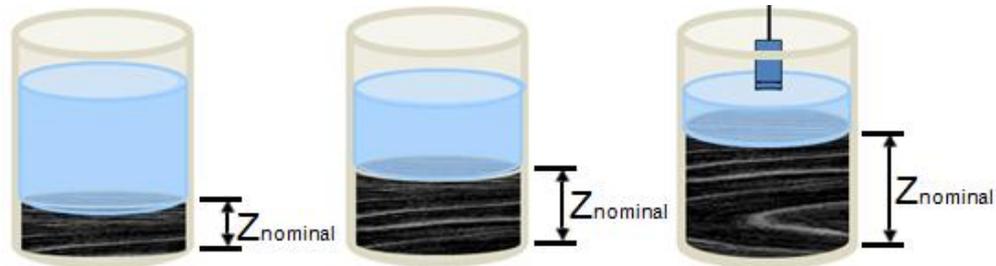


Figura 4.7. Esboço dos modelos físicos utilizados com três espessuras diferentes de material (10, 20 e 30 mm), usando o transdutor linear com as frequências de 5,0 MHz e 7,5 MHz.

4.4.4. Testes de Diferença de Contraste entre os Materiais

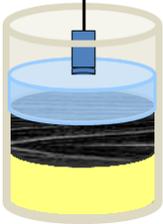
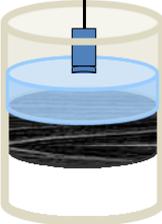
Diferentes materiais podem gerar intensidades distintas para o som refletido ou espalhado e, por isso, apareceram na imagem na forma de diferentes tons de cinza, isto é, aparecem contrastados.

Foram elaborados dois modelos de testes um com camadas sobrepostas de diferentes materiais acrescentados um a um cuidadosamente e outro contendo o mesmo material com granulometrias diferentes ou diferentes materiais com a mesma granulometria um ao lado do outro. Isso foi feito porque, se levarmos em conta a atenuação sofrida pelo sinal no feixe ultrassônico, os resultados de contraste entre sedimentos sobrepostos em camadas podem não ser uma representação fiel do contraste fornecido pelo material. Para evitar esse inconveniente, fez-se modelos, nos aquário de acrílico, onde os materiais foram sedimentados um ao lado do outro. As imagens, nesse caso, foram adquiridas em cinco partes e posteriormente agrupadas, devido ao pequeno campo de visão do transdutor. Para que o processo de montagem não interferisse na qualidade final da imagem, foram usados os mesmos parâmetros de aquisição.

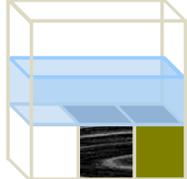
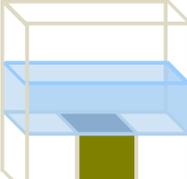
Os Quadros 4.4 e 4.5 apresentam esquemas dos modelos experimentados com diversos materiais em diferentes faixas granulométricas. A figura lateral, à esquerda, representa a configuração das amostras no modelo.

Diversas medidas foram feitas, sendo alterada ora a granulometria e ora o material sedimentado, conforme discutido na Seção 5.7.

Quadro 4.4. Representação dos modelos físicos (com granulometria e espessura de materiais empregados) usados no teste de contraste com duas camadas sobrepostas.

	<p>Carvão205 µm e Areia Fina230µm</p>		<p>Carvão205µm e Balotina177µm</p>
---	---	--	--

Quadro 4.5. Representação dos modelos físicos criados para análise do contraste, variando-se a granulometria e o tipo de material usando uma única camada de sedimento e dispostos “lado a lado”.

	<p>Balotina180-250 µm 3,0 cm</p>	<p>Carvão 205 µm (sem lavar) 3,0 cm</p>	<p>Areia Fina 180- 250 µm 3,0 cm</p>
	<p>Balotina177 µm 2,7 cm</p>	<p>Areia 230 µm 3,6 cm</p>	<p>Balotina177 µm 3,4 cm</p>

4.5. Microscopia Óptica

O microscópio óptico é um instrumento utilizado para ampliar e observar estruturas pequenas dificilmente visíveis ou invisíveis a olho nú. O microscópio óptico utiliza luz visível e um sistema de lentes de vidro que ampliam a imagem das amostras. Dois são os sistemas de lentes convergentes utilizados no microscópio óptico; a objetiva e a ocular. A objetiva é um conjunto de lentes que apresenta pequena distância focal e que fornece uma imagem real e ampliada do objeto que é observado. A ocular, também formada por lentes convergentes, funciona como uma

lupa, que nos dá uma imagem virtual e aumentada da imagem real que se formou pela objetiva.

A objetiva e a ocular são dispostas nas extremidades de um cilindro oco, constituindo a coluna do microscópio e que possui a capacidade de se aproximar ou afastar da amostra para que se tenha a focalização perfeita. Isto é realizado por intermédio de uma cremalheira que se acha associada a uma roda dentada.

A potência do microscópio é resultado do produto da ampliação linear da objetiva pela potência da ocular; seu valor será elevado quando as distâncias focais da objetiva e ocular forem pequenas.

O poder separador, ou distância mínima distinguível entre dois pontos é limitado pela difração da luz. Assim, se o feixe de luz incidente tiver uma abertura angular grande e for utilizadas lentes de inversão, o poder separador será melhorado, pois elimina-se difração das bordas da lente. Nesse trabalho foi utilizado um microscópio óptico NIKON modelo ECLIPSE E200 com uma faixa de ampliações entre 4 e 100 X.

4.6. Microscopia Eletrônica de Varredura

O microscópio eletrônico de varredura utiliza um feixe de elétrons focalizado de pequeno diâmetro e altas energias para explorar a superfície da amostra ponto a ponto. Elétrons secundários ou retroespalhados pela amostra são coletados e amplificados para fornecer um sinal elétrico. Este sinal é tratado por um sistema eletrônico para gerar uma imagem em computador, o que facilita técnicas de processamento de imagens. O MEV consiste, basicamente, de quatro diferentes sistemas. O primeiro refere-se ao sistema de iluminação e formação de imagem. O segundo sistema é o de captação da informação. O terceiro sistema é responsável pela exibição da imagem, além do sistema de vácuo.

Nesse trabalho as imagens de MEV foram obtidas através do modo de elétrons secundários (SE). Os elétrons secundários são gerados pelos elétrons do feixe primário, à medida que o mesmo vai penetrando na amostra, e também pelos elétrons retroespalhados quando estes vão deixando a amostra, portanto podem ser classificados como elétrons secundários do tipo I e II. Elétrons secundários do tipo I

são os gerados quando o feixe de elétrons primários interage numa região menor do que “x” e são ditos elétrons de alta resolução. Elétrons secundários do tipo II são os elétrons emitidos da superfície, provenientes da interação de um elétron do feixe primário que sofreu retroespalhamento dentro do material. Esses elétrons são de baixa resolução e fornecem informações do elétron retroespalhado.

Nesse trabalho, as imagens de MEV foram obtidas em um microscópio eletrônico de varredura ZEISS modelo EVO M10, pertencente ao Laboratório de Implantação Iônica da UFRGS. Para o imageamento, as amostras foram fixadas em pequenas placas circulares de aço inoxidável com aproximadamente 1 cm de diâmetro e posteriormente recobertas com ouro para melhorar o nível de emissão de elétrons.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a intenção de se obter resultados compatíveis para atender aos propósitos de imageamento não invasivo de depósitos sedimentares de tanques de simulação, alguns testes foram fundamentais para a elaboração dos modelos físicos como o tempo de sedimentação e a profundidade máxima de visualização. Além disso, o conhecimento de características como massa específica e velocidade de queda, bem como a resposta de alguns materiais às análises de contraste e velocidade de propagação também são de vital importância, pois variam de acordo com características intrínsecas do material e serão mostrados com detalhes a seguir.

5.1. Características dos Materiais Experimentados nos Modelos

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura dos materiais e compósitos empregados, que visam observar a morfologia das partículas. Tais imagens foram adquiridas no modo de elétrons secundários, com energia de 20 kv e ampliações que variaram de 80 x a 500 x. A morfologia externa das partículas do material apresenta diversas formas, o que para os testes de imageamento torna-se uma característica bem vinda. Os materiais com formato sub-anguloso foram identificados como o carvão, RP, RPNF e PMMA. Apenas um material foi identificado com formato arredondado como é o caso da areia. Também foi classificado somente um material com formato sub-arredondado que é o caso do GPMMA. O balotine foi classificado com formato esférico e o calcário com o formato anguloso. Todos os materiais também foram imageados por microscopia óptica com o intuito de observar possíveis estruturas internas nos mesmos. As imagens estão apresentadas na Figura 5.3 e revelam uma estrutura oca para o balotine, conforme esperado.

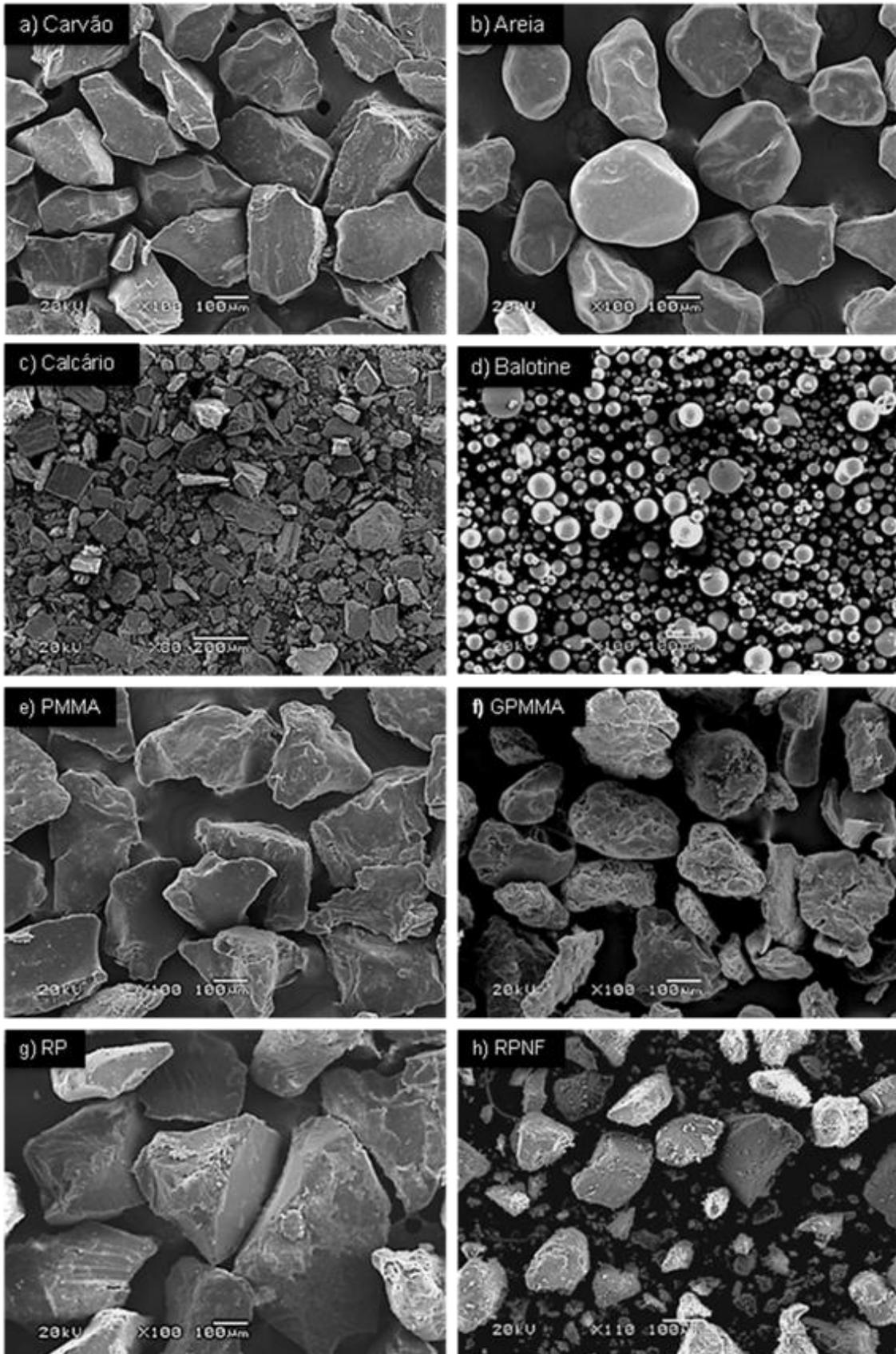


Figura 5.1. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV – 100x) para classificar os materiais pela geometria da partícula, onde temos: a) carvão 205, b) areia (quartzo), c) calcário, d) balotina (vidro), e) Poli(metilmetacrilato) (PMMA), f) Poli(metilmetacrilato) com grafite (GPMMA), g) Resina poliéster pura (RP) e h) Resina poliéster com negro de fumo (RPNF).

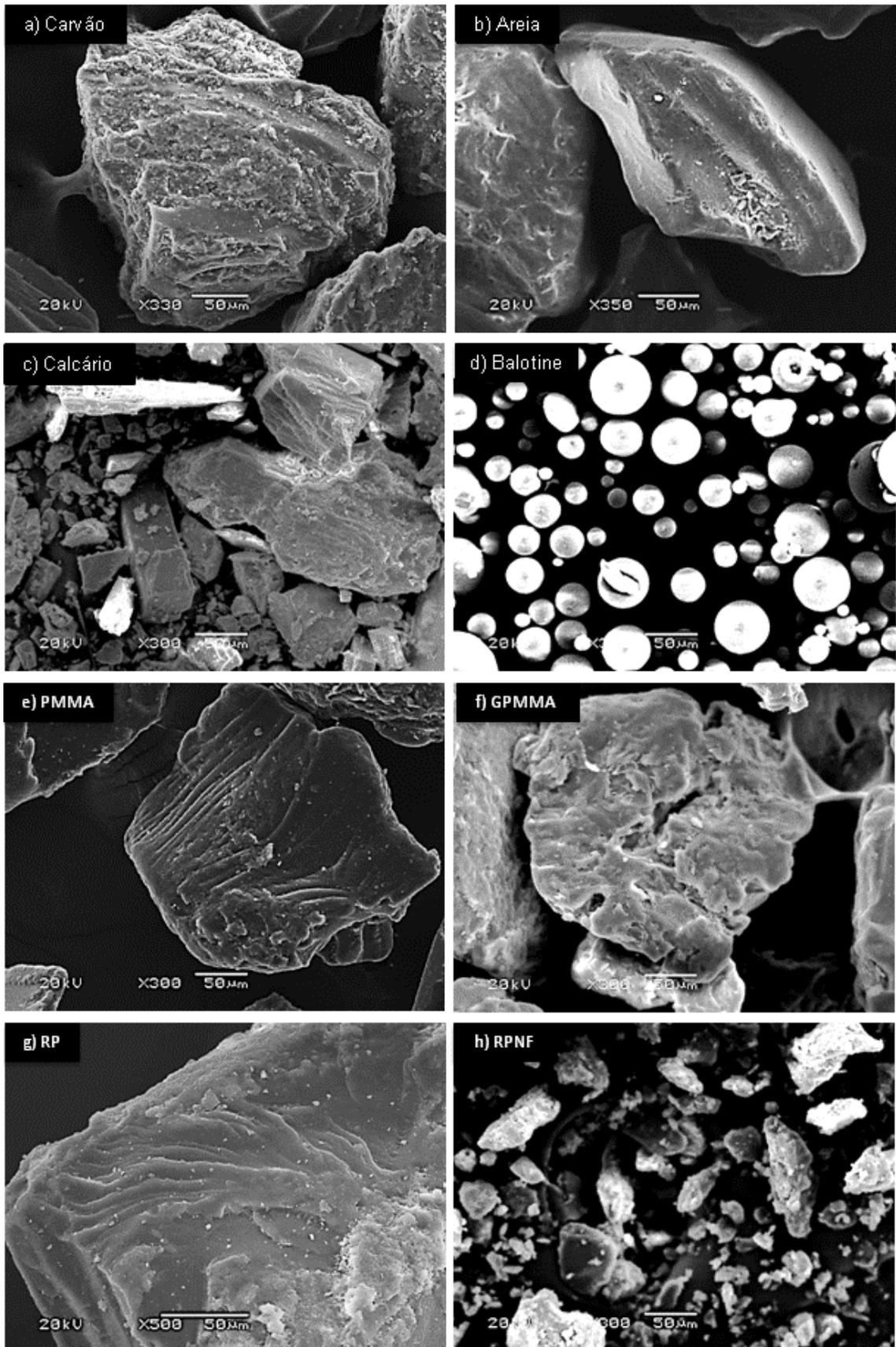


Figura 5.2. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV – 300x) para classificar os materiais pela geometria da partícula, onde temos: a) carvão 205, b) areia (quartzo), c) calcário, d) balotine (vidro), e) Poli(metilmetacrilato) (PMMA), f) Poli(metilmetacrilato) com grafite (GPMMA), g) Resina poliéster pura (RP) e h) Resina poliéster com negro de fumo (RPNF).

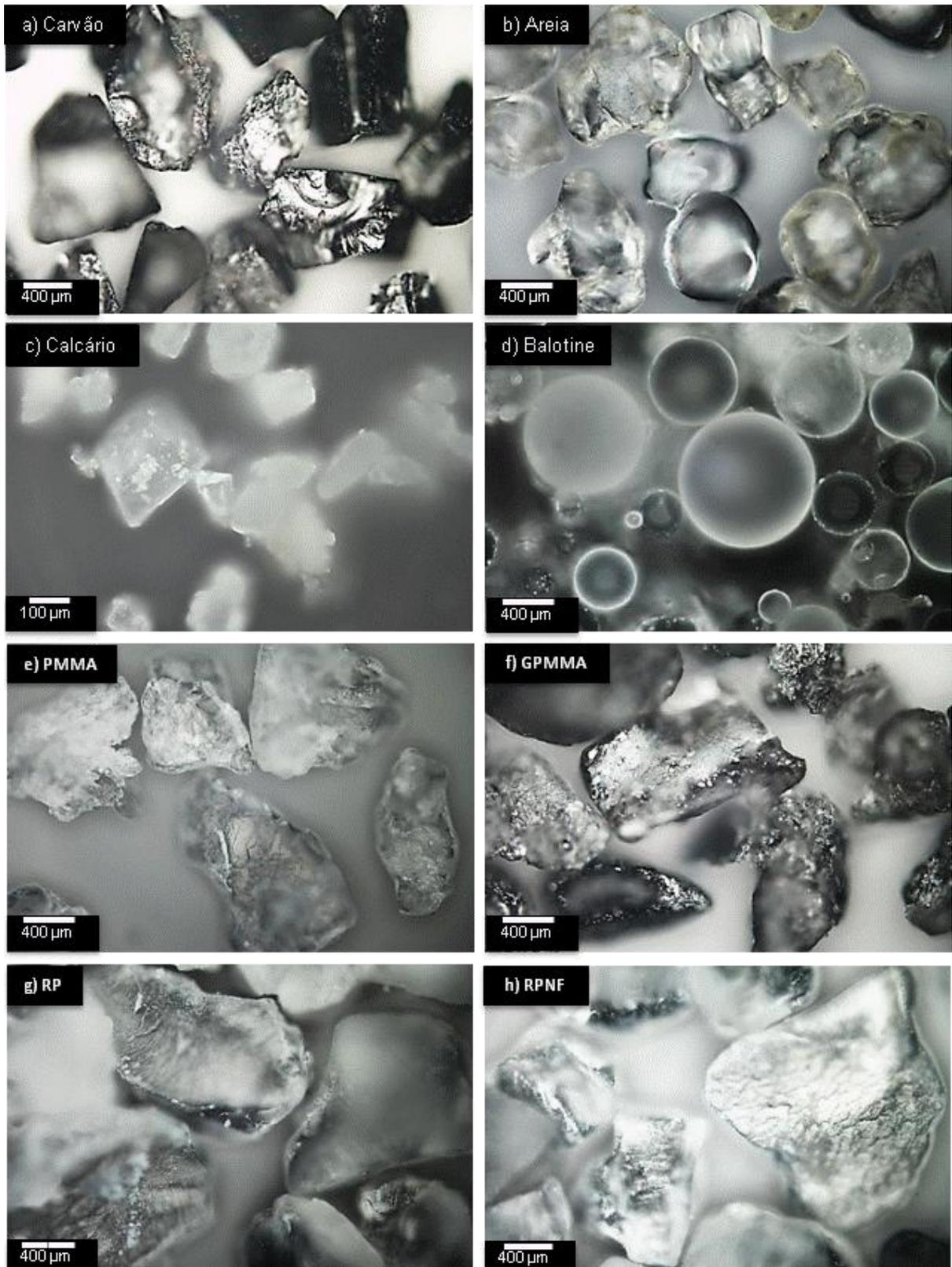


Figura 5.3. Imagens de microscopia óptica para verificar a estrutura interna das partículas dos materiais, onde temos: a) carvão 205, b) areia (quartzo), c) calcário, d) balotina (vidro), e) Poli(metilmetacrilato) (PMMA), f) Poli(metilmetacrilato) com grafite (GPMMA), g) Resina poliéster pura (RP) e h) Resina poliéster com negro de fumo (RPNF).

A Figura 5.4 a), mostra-se histogramas produzidos a partir dos dados de um granulômetro, das amostras dos materiais convencionais, preparados com granulometrias menores que $180\mu\text{m}$ e entre 180 e $250\mu\text{m}$. Com exceção do carvão e do calcário, os materiais foram lavados e peneirados para garantir que a granulometria ficasse o mais uniforme possível. Antes do pico maior da curva existe um pequeno pico devido a existência de resíduos (pó da moagem), que permaneceram durante a lavagem. A curva granulométrica dos materiais ensaiados fornece a distribuição de tamanhos das partículas existente na amostra. Ela permite a determinação da granulometria com maior ocorrência e teve como finalidade selecionar os materiais por faixa de tamanho de grão. Nessa Seção estão representadas as curvas granulométricas dos materiais convencionais como: Areia (quartzo), balotine (vidro), calcário, carvão 205, na faixa menor que $180\mu\text{m}$.

A Figura 5.4 b), mostra-se histogramas dos materiais poliméricos utilizados nas granulometrias menores que $180\mu\text{m}$ e entre 180 e $250\mu\text{m}$ e aparecem representados com a mesma cor. Observa-se que as curvas apresentam comportamentos bem semelhantes aos histogramas da Figura 5.4 a), inclusive o pico de resíduo pós lavagem. Além disso, estão representadas as curvas granulométricas dos materiais dos novos compósitos: Poli(metilmacrilato) (PMMA), Poli(metilmacrilato) com grafite (GPMMA), resina poliéster pura (RP), resina poliéster com negro de fumo (RPNF), na faixa de 180 a $250\mu\text{m}$.

Na Figura 5.5, são apresentados os histogramas dos materiais convencionais e artificiais produzidos em moinho de bolas numa faixa granulométrica de 500 a $1700\mu\text{m}$. O comportamento das curvas apresentadas mostra novamente um pequeno percentual de pó da moagem junto às amostras. Neles, encontram-se representadas as curvas granulométricas dos materiais com maiores granulometrias como: carvão 210, Poli(metilmacrilato) (PMMA), resina poliéster pura (RP), Poli(metilmacrilato) com grafite (GPMMA) e resina poliéster com negro de fumo (RPNF). A Seção sobre contraste aborda as vantagens que motivaram o emprego de granulometrias maiores.

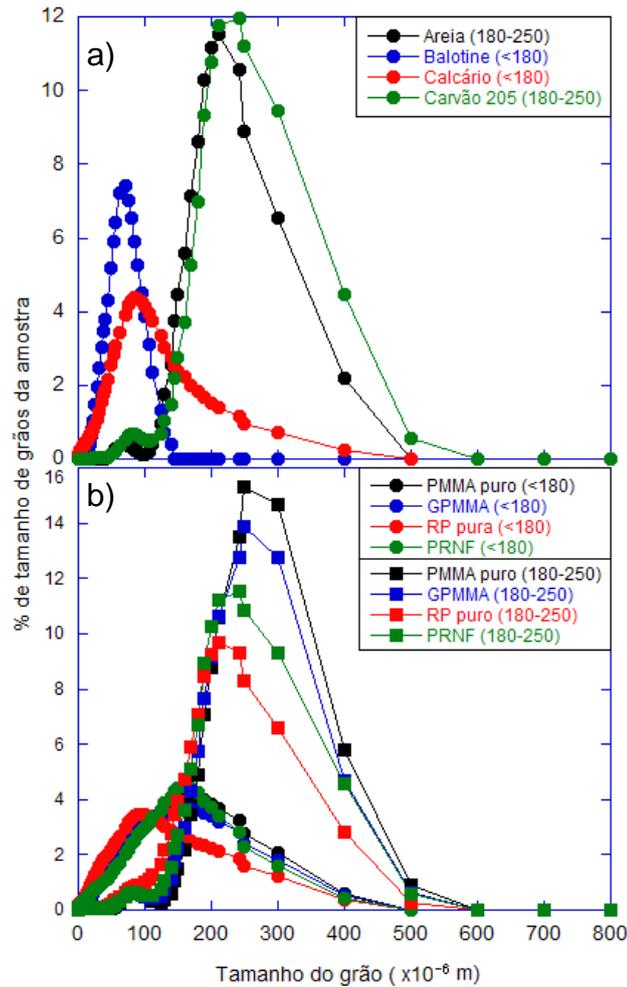


Figura 5.4. a) Curvas granulométricas dos materiais convencionais com granulometrias entre 180-250 μm . b) Curvas granulométricas dos novos compostos com granulometrias entre 180-250 μm . Em ambos os casos os materiais foram peneirados e lavados.

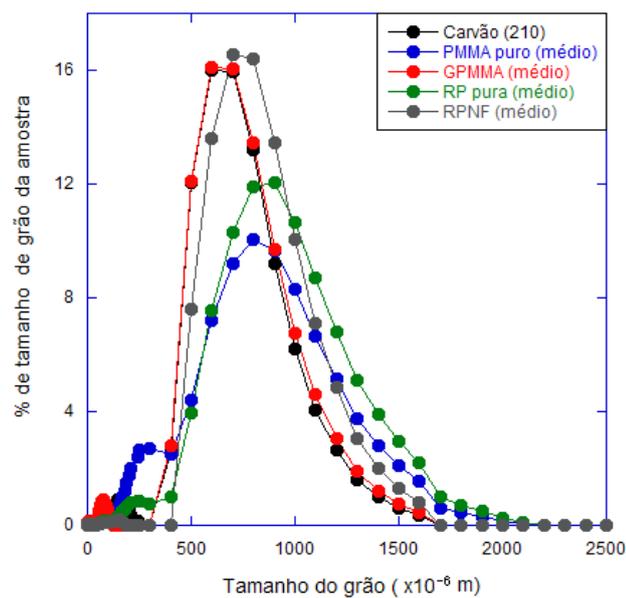


Figura 5.5. Curvas granulométricas do carvão 210, Poli(metilmetacrilato) (PMMA), Resina poliéster pura (RP), Poli(metilmetacrilato) com grafite (GPMMA) e Resina poliéster com negro de fumo (RPNF) na faixa de 500 a 1700 μm .

A Tabela 5.1 relaciona a faixa granulométrica, a granulometria mais frequente e a morfologia granular de todas as amostras estudadas.

Tabela 5.1. Características dos materiais quanto a tamanho e forma da partícula.

Material	Média granulométrica (μm)	Faixa granulométrica (μm)	Moda granulométrica (μm)	Geometria do grão
Carvão 205 ($<180\mu\text{m}$)	278	100 a 500	243	Sub-anguloso
Carvão 210	758	300 a 1400	600	
Calcário ($<180\mu\text{m}$)	147	10 a 490	86	Anguloso
Areia (quartzo) ($<180\mu\text{m}$)	218	75 a 500	183	Arredondado
Areia (quartzo) ($180-250\mu\text{m}$)	252	90 a 500	213	
Balotine (vidro) ($<180\mu\text{m}$)	72	10 a 140	72	Esférico
RP ($<180\mu\text{m}$)	170	0 a 500	95	Sub-anguloso
RP ($180-250\mu\text{m}$)	260	50 a 500	208	
RP ($400-1500\mu\text{m}$)	964	400 a 2000	900	
PRNF ($<180\mu\text{m}$)	188	10 a 490	163	Sub-anguloso
PRNF ($180-250\mu\text{m}$)	279	100 a 500	243	
PRNF ($400-1500\mu\text{m}$)	851	408 a 1700	750	
GPMMA ($<180\mu\text{m}$)	188	0 a 500	164	Sub-arredondado
GPMMA ($180-250\mu\text{m}$)	283	100 a 500	250	
GPMMA ($400-1500\mu\text{m}$)	773	308 a 1708	700	
PMMA ($<180\mu\text{m}$)	195	0 a 500	173	Sub-anguloso
PMMA ($180-250\mu\text{m}$)	292	133 a 600	250	
PMMA ($400-1500\mu\text{m}$)	891	316 a 2000	800	

A ABNT NBR 7389:1992 descreve um método qualitativo de análise dos agregados para concreto. Em geologia a técnica utilizada chama-se morfoscopia e é praticamente a mesma dessa norma, entretanto com maior número de arredondamento. Segundo essa norma, deve-se avaliar a forma do grão visualmente, comparando-se com padrões gráficos que indicam o grau de esfericidade e arredondamento, conforme mostra a Figura 5.6. Enquanto o grau de esfericidade mostra o quanto o grão se aproxima da forma esférica, o arredondamento se relaciona com o grau de curvatura dos cantos.



Figura 5.6. Padrões gráficos indicando o grau de esfericidade e arredondamento para fins de comparação com os materiais em questão.

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores de massa específica e velocidade de queda para cada material de acordo com a sua granulometria. Os valores de massa específica foram obtidos de acordo com a DNER-ME 093/94, que adota para o cálculo:

$$D_t = \frac{P_1 - P_2}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \cdot D'_t \quad (5.1)$$

onde, D_t é a massa específica real da amostra [kg/m^3] à temperatura t ; P_1 é a massa do picnômetro vazio [g]; P_2 é a massa do picnômetro contendo a amostra [g]; P_3 é a massa do picnômetro contendo a amostra e álcool etílico [g]; P_4 é a massa do picnômetro [g] e D'_t é a massa específica do álcool etílico [kg/m^3] à temperatura t .

Os valores encontrados na Tabela 5.2 são da velocidade de queda média de queda das partículas e massa específica. Através da análise dos dados citados nessa tabela, percebe-se que os valores de velocidade de queda aumentam proporcionalmente aos valores de granulometria para todos os materiais, como esperado. A massa específica da areia apresenta valores maiores que a do balotine, devido a existência de ar no interior do grão do balotine, apesar dos materiais terem a mesma constituição.

Tabela 5.2. Características dos materiais quanto a massa específica e velocidade de queda. O erro associado aos valores de velocidade, em todos os casos, ficou em torno de 30% para mais e para menos.

Material	Massa específica (g/cm ³)	V _{queda} (m/s)
Carvão 205 (<250µm)	1,22	0,007
Carvão 210 (400-1500µm)	1,19	0,014
Calcário (<180µm)	2,10	0,010
Areia (quartzo) (<180µm)	2,35	0,019
Areia (quartzo) (180-250µm)		0,027
Balotine (vidro) (<180µm)	1,63 **	0,007
RP (<180µm) *	1,1	0,004
RP (180-250µm) *		0,006
RP (400-1500µm) *		0,022
RPNF (<180µm) *	1,14	0,005
RPNF (180-250µm) *		0,006
RPNF (400-1500µm) *		0,025
GPMMA (<180µm) *	1,24	0,004
GPMMA (180-250µm) *		0,006
GPMMA (400-1500µm) *		0,016
PMMA (<180µm) *	1,17	0,003
PMMA (180-250µm) *		0,011
PMMA (400-1500µm) *		0,020

* Materiais artificiais de base polimérica.

** Devido ao fato do balotine ser oco essa grandeza deve ser expressa com densidade.

Esses valores são da ordem de 5×10^{-3} m/s para os materiais artificiais, com granulometria menor do que 180 µm e da ordem de 7×10^{-3} m/s para os materiais convencionais, com mesma granulometria. Entretanto, no caso do GPMMA, observa-se um decréscimo dos valores de velocidade de queda, para todas as granulometrias utilizadas, apesar de apresentar maior massa específica. Isso ocorre possivelmente devido às imperfeições morfológicas dos grãos, que apresentam uma maior porosidade, como pode ser visto nas Figuras 5.1 e 5.2.

5.2. Dinâmica de Sedimentação do Carvão 205

Tendo em vista a grande quantidade de partículas em suspensão em especial para o carvão 205 que não foi lavado, optou-se por analisar o tempo de sedimentação em mais detalhe para esse material.

A Figura 5.7 mostra a evolução da coluna de carvão depositado no fundo do recipiente em função do tempo após a adição do material na água. Durante a sedimentação do material, nas regiões marcadas 1, 2 e 3, era aplicada pequenas perturbações no recipiente, observando a sedimentação continua do carvão. Contudo entre as regiões 1-2 e 2-3, observam-se patamares no qual a coluna do carvão praticamente não evoluiu. Isso corresponde aos intervalos nos quais o sistema não era perturbado, pois não estava sendo feitas medidas e a coluna de sedimentação atingia um estado “metaestável”.

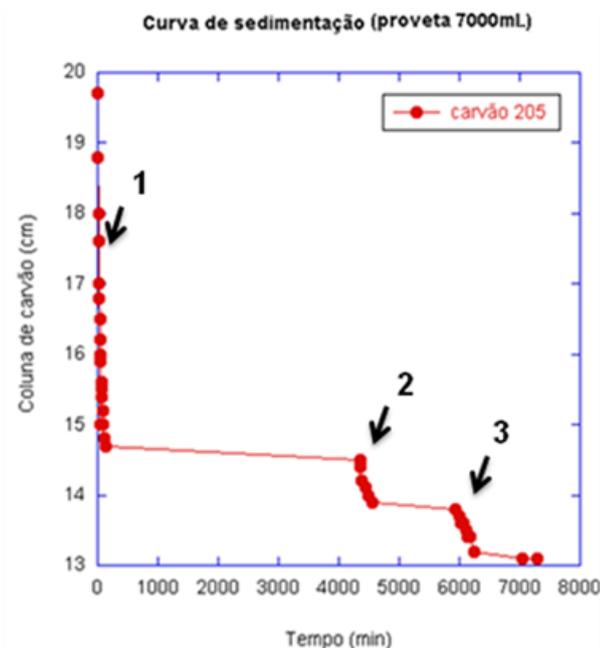


Figura 5.7. Representação o comportamento metaestável durante o processo de sedimentação.

Essa característica metaestável pode ser compreendida como um armadilhamento de água, que permeia as partículas e é expulsa durante alguma perturbação do sistema. O processo repete-se até que o sistema adquira um grau elevado de compactação. A Figura 5.8, mostra a interface carvão/água após o sistema ser perturbado de seu estado de repouso. Como se nota, pequenos cones

formam-se na superfície, quando a água que permeia as partículas é expulsa durante a acomodação do material. O processo de acomodação continua, até encontrar novo estado de equilíbrio. Esse processo é bastante conhecido em geologia como processo de escape de fluídos.

Conclui-se, portanto, que o uso de Carvão como material de simulação do processo de sedimentação deve ser empregado com grande cuidado para evitar ou minimizar esse processo metaestável. De fato, quando a agitação contínua é empregada (Fig. 5.8) a coluna tende ao equilíbrio em um processo contínuo.



Figura 5.8. Fotografia de pequenos cones que se formam na superfície do sedimento, quando a água que permeia as partículas é expulsa durante a acomodação do material.

5.2.1. Efeitos da Coluna de Água

As Figuras 5.9, 5.10, 5.11 mostram o comportamento do material em processo de acomodação, sendo agitado periódico e cuidadosamente, para evitar o processo de estabilização metaestável. As curvas obtidas com o tempo de sedimentação mostraram que a velocidade de deposição do carvão 205 apresenta maior velocidade no início do processo e diminuem rapidamente até estabilizarem. Podemos notar similaridades nas respectivas inclinações obtidas para as três provetas. Contudo, de acordo com as alturas das colunas de água usadas o tempo de acomodação modificou-se. Isso sugere que o tempo de acomodação é bastante influenciado pela dispersão do material no volume total de água misturado. As pequenas partículas existentes na faixa granulométrica utilizada (180 - 250 μm) são também responsáveis pelo aumento no tempo de sedimentação. O tempo de acomodação do carvão 205 é de 400 minutos (aproximadamente 7 horas).

Nos modelos analisados houve pouca influência da pressão hidrostática na compressão final do sedimento, já que ele estabiliza praticamente na mesma altura final e em tempos totais similares.

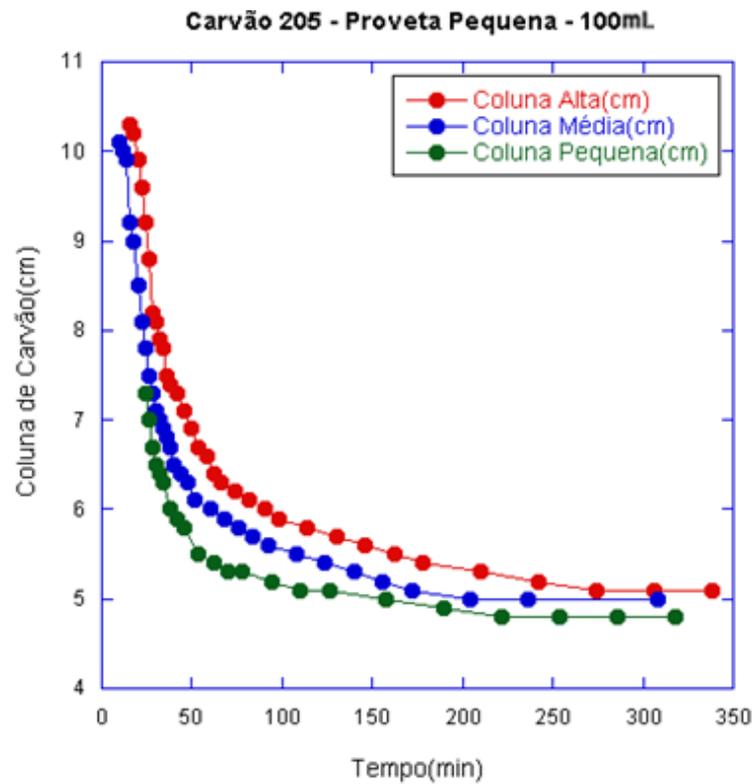


Figura 5.9. Gráfico de sedimentação realizado em proveta pequena (100 mL).

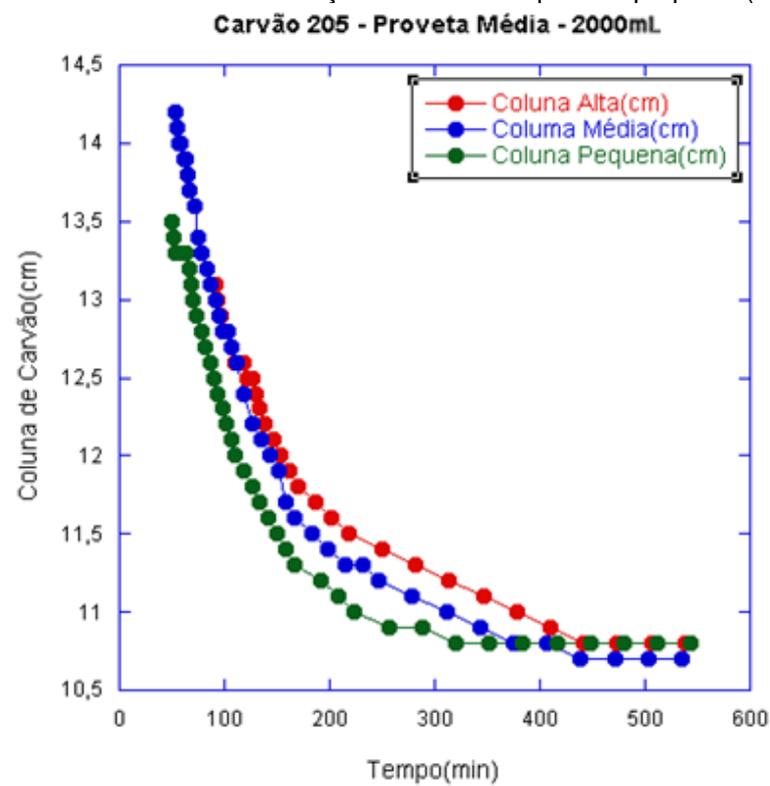


Figura 5.10. Gráfico de sedimentação realizado em proveta média (2000 mL).

As Tabelas 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 apresentam os valores de velocidade de propagação do som nos materiais utilizados com diferentes granulometrias, obtidas para duas frequências. A velocidade de propagação acústica apresentou os maiores valores nos materiais com partículas menores, ou seja, 1989 m/s para o carvão 205 (<250 μm) e uma velocidade da ordem de 1600 m/s para a areia, balotina, RP, RPNF, PMMA e GPMMA, com granulometria menos que 180 μm , isso sugere que devido ao pequeno tamanho granular a compactação da amostra sedimentada seja maior contribuindo para esse aumento. A variação das medidas de velocidade de propagação são causadas por pequenas variações de medida e não foram removidos das tabelas para ser o mais fidedigno possível. O desvio padrão dos valores obtidos mostra as variações de medida do método adotado.

Tabela 5.3. Valores das velocidades de propagação do som no Carvão 205 e no carvão 210.

CARVÃO 205						
Frequência (MHz)	Espessura de Carvão(mm)	Carvão (mm)	Água (mm)	Água (mm)	$V_{\text{carvão}}$ (m/s)	$V_{\text{água}}$ (m/s)
	nominal	imagem	nominal	imagem		
5,0	22	16,7	30	30,7	2029 \pm 050	1505 \pm 40
7,5	22	17,5	28	29,3	1936 \pm 102	1472 \pm 62
5,0	32	25,5	26	26,5	1933 \pm 050	1511 \pm 40
7,5	32	25,2	28	27,1	1956 \pm 102	1591 \pm 62
5,0	39	30,7	27	28,9	1956 \pm 050	1439 \pm 40
7,5	39	28,3	27	26,7	2122 \pm 102	1557 \pm 62
Média:					1989 \pm 074	1512 \pm 55

CARVÃO 210						
Frequência (MHz)	Espessura de Carvão(mm)	Carvão (mm)	Água (mm)	Água (mm)	$V_{\text{carvão}}$ (m/s)	$V_{\text{água}}$ (m/s)
	nominal	imagem	nominal	imagem		
5,0	29	25,6	35,0	34,1	1745 \pm 43	1581 \pm 43
7,5	29	25,5	35,0	34,4	1751 \pm 55	1567 \pm 41
5,0	28	25,7	30,9	30,9	1678 \pm 43	1540 \pm 43
7,5	28	24,8	30,0	30,0	1739 \pm 55	1540 \pm 41
5,0	36	33,3	30,0	30,9	1665 \pm 43	1495 \pm 43
7,5	36	33,6	30,0	31,1	1650 \pm 55	1486 \pm 41
Média:					1705 \pm 45	1535 \pm 38

Tabela 5.4. Valores das velocidades de propagação do som no Calcário, Areia (<180µm), areia (180-250 µm) e no Balotine (<180µm).

CALCÁRIO						
Frequência (MHz)	Espessura de Calcário (mm)	Calcário (mm)	Água (mm)	Água (mm)	V _{calcário} (m/s)	V _{água} (m/s)
	nominal	imagem	nominal	imagem		
5,0	14,0	13,0	26	25,0	1658 ± 09	1602 ± 36
7,5	14,0	13,6	26	24,9	1585 ± 60	1608 ± 30
5,0	24,5	23,0	26	26,0	1640 ± 09	1540 ± 36
7,5	24,5	22,3	26	25,6	1692 ± 60	1564 ± 30
5,0	29,0	27,0	27	27,0	1654 ± 09	1540 ± 36
7,5	29,0	26,5	27	26,8	1685 ± 60	1551 ± 30
Média:					1653 ± 38	1568 ± 30

AREIA (<180 µm)						
Frequência (MHz)	Espessura de Areia (mm)	Areia (mm)	Água (mm)	Água (mm)	V _{areia} (m/s)	V _{água} (m/s)
	nominal	imagem	nominal	imagem		
5,0	11	10,0	28	27,1	1694± 63	1591± 22
7,5	11	9,7	28	27,0	1746± 94	1597± 23
5,0	16	15,6	29	28,8	1579± 63	1551± 22
7,5	16	15,8	29	28,2	1559± 94	1584± 23
5,0	24	23,2	22	21,8	1593± 63	1554± 22
7,5	24	22,6	22	20,8	1635± 94	1629± 23
Média:					1635 ± 73	1584 ± 29

AREIA (180-250 µm)						
Frequência (MHz)	Espessura de Areia(mm)	Areia (mm)	Água (mm)	Água (mm)	V _{areia} (m/s)	V _{água} (m/s)
	nominal	imagem	nominal	imagem		
5,0	10,5	10,9	34	35,0	1483 ± 46	1496 ± 16
7,5	10,5	10,8	33	34,0	1497 ± 38	1495 ± 24
5,0	19,5	19,1	25	25,2	1572 ± 46	1528 ± 16
7,5	19,5	19,1	20	20,6	1572 ± 38	1495 ± 24
5,0	29,5	29,4	32	32,7	1545 ± 46	1507 ± 16
7,5	29,5	29,8	30	31,8	1524 ± 38	1453 ± 24
Média:					1532 ± 38	1496 ± 24

BALOTINE (<180 µm)						
Frequência (MHz)	Espessura de Balotine (mm)	Balotine (mm)	Água (mm)	Água (mm)	V _{balotine} (m/s)	V _{água} (m/s)
	nominal	imagem	nominal	imagem		
5,0	15	14,8	43	43,8	1561 ± 078	1512 ± 17
7,5	15	14,6	46	46,4	1582 ± 127	1527 ± 17
5,0	18	16,9	32	33,2	1640 ± 078	1484 ± 17
7,5	18	15,2	35	36,1	1824 ± 127	1493 ± 17
5,0	31	27,8	25	26,0	1717 ± 078	1481 ± 17
7,5	31	29,2	24	24,4	1635 ± 127	1515 ± 17
Média:					1660 ± 097	1502 ± 19

Tabela 5.5. Valores das velocidades de propagação do som RP (<180 µm), RP (180-250 µm), RPNF (<180 µm) e RPNF (180-250 µm),

RP (<180 µm)						
Frequência (MHz)	Espessura de RP(mm)		Água (mm)		V _{RP} (m/s)	V _{água} (m/s)
	nominal	imagem	nominal	imagem		
5,0	9,0	8,7	31	31,3	1593±131	1525±130
7,5	9,0	8,9	31	30,7	1557±188	1555± 010
5,0	12	10,0	31	35,7	1848±131	1337±130
7,5	12	9,8	31	30,7	1886±188	1555± 100
5,0	13	12	20	19,4	1668±131	1588±130
7,5	13	12,8	19	18,6	1564±188	1573± 010
Média:					1686±146	1522± 093

RP (180-250 µm)						
Frequência (MHz)	Espessura de RP(mm)		Água (mm)		V _{RP} (m/s)	V _{água} (m/s)
	nominal	imagem	nominal	imagem		
5,0	10	9,70	22	20,8	1588±45	1629±65
7,5	10	9,80	22	21,8	1571± 40	1554± 21
5,0	11	10,1	29	29,1	1677±45	1535±65
7,5	11	10,3	29	29,5	1645± 40	1514± 21
5,0	12	11,4	34	34,8	1621±45	1505±65
7,5	12	11,7	34	33,9	1579± 40	1545± 21
Média:					1614±42	1547±44

RPNF (<180 µm)						
Frequência (MHz)	Espessura de RPNF(mm)		Água (mm)		V _{RPNF} (m/s)	V _{água} (m/s)
	nominal	imagem	nominal	imagem		
5,0	13	12,0	20	19,4	1668 ± 42	1588 ± 54
7,5	13	12,8	19	18,6	1564 ± 50	1573 ± 19
5,0	23	22,0	32	32,0	1610 ± 42	1540 ± 54
7,5	23	22,4	33	33,1	1581 ± 50	1535 ± 19
5,0	28	25,5	25	26,0	1691 ± 42	1481 ± 54
7,5	28	26,0	26	25,7	1658 ± 50	1558 ± 19
Média:					1628 ± 51	1545 ± 37

RPNF (180-250 µm)						
Frequência (MHz)	Espessura de RPNF (mm)		Água (mm)		V _{RPNF} (m/s)	V _{água} (m/s)
	nominal	imagem	nominal	imagem		
5,0	13	12,2	25	25,0	1641 ± 20	1540 ± 38
7,5	13	12,0	25	25,2	1668 ± 50	1528 ± 25
5,0	26	25,0	25	26,2	1602 ± 20	1469 ± 38
7,5	26	25,2	25	25,0	1589 ± 50	1540 ± 25
5,0	30	28,5	25	25,2	1621 ± 20	1528 ± 38
7,5	30	27,5	26	25,4	1680 ± 50	1576 ± 25
Média:					1633± 36	1530 ± 35

Tabela 5.6. Valores das velocidades de propagação do som RPNF (médio), GPMMA (<180 µm), GPMMA (180-250 µm) e GPMMA (médio),

RPNF (médio)						
Frequência (MHz)	Espessura de RPNF(mm) nominal	RPNF (mm)	Água (mm)	Água (mm)	V _{RPNF} (m/s)	V _{água} (m/s)
		imagem	nominal	imagem		
5,0	20	19,4	24	24,6	1588± 05	1502± 38
7,5	20	19,7	24	23,7	1563± 31	1559± 46
5,0	25	24,1	28	27,6	1598± 05	1562± 38
7,5	25	23,7	28	27,4	1624± 31	1574± 46
5,0	28	27,1	29	28,4	1591± 05	1573± 38
7,5	28	27,2	29	30,0	1585± 31	1489± 46
Média:					1592 ± 20	1543±38

GPMMA (<180 µm)						
Frequência (MHz)	Espessura de GPMMA(mm) nominal	GPMMA (mm)	Água (mm)	Água (mm)	V _{GPMMA} (m/s)	V _{água} (m/s)
		imagem	nominal	imagem		
5,0	12	11,1	15	15,1	1665±33	1530±6
7,5	12	11,3	15	15,1	1635±25	1530±23
5,0	18	17,1	15	15,0	1621±33	1540±6
7,5	18	17,1	15	15,5	1621±25	1490±23
5,0	24	23,1	15	15,0	1600±33	1540±6
7,5	24	23,3	15	15,1	1586±25	1530±23
Média:					1621±27	1527±18

GPMMA (180-250 µm)						
Frequência (MHz)	Espessura de GPMMA(mm) nominal	GPMMA (mm)	Água (mm)	Água (mm)	V _{GPMMA} (m/s)	V _{água} (m/s)
		imagem	nominal	imagem		
5,0	09	9,00	28	29,0	1540 ± 09	1487 ± 54
7,5	09	9,20	29	28,8	1507 ± 45	1551 ± 14
5,0	14	14,0	30	29,0	1540 ± 09	1593 ± 54
7,5	14	14,1	30	29,4	1529 ± 45	1571 ± 14
5,0	30	30,3	29	28,7	1525 ± 09	1556 ± 54
7,5	30	29,0	29	28,9	1593 ± 45	1545 ± 14
Média:					1539 ± 29	1551 ± 36

GPMMA (médio)						
Frequência (MHz)	Espessura de GPMMA(mm) nominal	GPMMA (mm)	Água (mm)	Água (mm)	V _{GPMMA} (m/s)	V _{água} (m/s)
		imagem	nominal	imagem		
5,0	15	15,5	30	30,0	1490± 58	1540± 29
7,5	15	14,4	30	31,5	1604± 35	1467± 42
5,0	20	19,7	30	31	1563± 58	1490± 29
7,5	20	19,3	30	31,5	1596± 35	1467± 42
5,0	25	24,0	30	30,0	1604± 58	1540± 29
7,5	25	25,0	30	30,0	1540± 35	1540± 42
Média:					1566 ± 45	1507 ± 37

Tabela 5.7. Valores das velocidades de propagação do som PMMA (<180 μm), PMMA (180-250 μm) e PMMA (médio).

PMMA (<180 μm)						
Frequência (MHz)	Espessura de PMMA (mm)	PMMA (mm)	água (mm)	água (mm)	V_{PMMA} (m/s)	$V_{\text{água}}$ (m/s)
		imagem	nominal	imagem		
5,0	07	6,4	33	33,3	1684 \pm 113	1526 \pm 27
7,5	07	6,1	33	33,1	1767 \pm 190	1535 \pm 28
5,0	18	15,3	27	26,3	1812 \pm 113	1581 \pm 27
7,5	18	15,5	27	27,1	1788 \pm 190	1534 \pm 28
5,0	27	26,2	25	24,8	1587 \pm 113	1552 \pm 27
7,5	27	28,7	25	25,9	1449 \pm 190	1486 \pm 28
Média:					1681\pm141	1536\pm31

PMMA (180-250 μm)						
Frequência (MHz)	Espessura de PMMA (mm)	PMMA (mm)	água (mm)	água (mm)	V_{PMMA} (m/s)	$V_{\text{água}}$ (m/s)
		imagem	nominal	imagem		
5,0	17	16,7	24	23,8	1568 \pm 14	1553 \pm 61
7,5	17	16,4	24	23,8	1596 \pm 29	1553 \pm 34
5,0	23	23,0	30	30,9	1540 \pm 14	1495 \pm 61
7,5	23	22,9	30	30,1	1547 \pm 29	1535 \pm 34
50	23	22,7	25	23,8	1560 \pm 14	1618 \pm 61
7,5	23	22,9	25	25,9	1547 \pm 29	1486 \pm 34
Média:					1560\pm21	1540\pm47

PMMA (médio)						
Frequência (MHz)	Espessura de PMMA (mm)	PMMA (mm)	Água (mm)	Água (mm)	V_{PMMA} (m/s)	$V_{\text{água}}$ (m/s)
		imagem	nominal	imagem		
5,0	15	15,3	19	19,2	1510 \pm 49	1524 \pm 126
7,5	20	19,4	26	23,2	1588 \pm 45	1726 \pm 068
5,0	20	19,4	26	24,4	1588 \pm 49	1641 \pm 126
7,5	25	25,2	19	19,5	1528 \pm 45	1501 \pm 068
50	25	25,5	19	19,2	1510 \pm 49	1524 \pm 126
7,5	15	15,3	19	19,2	1510 \pm 45	1524 \pm 068
Média:					1535 \pm 42	1572 \pm 091

5.4. Profundidade Máxima de Visualização

Na Figura 5.13. a) observa-se uma imagem em *Modo B*, usada para medir a profundidade máxima que o sinal acústico alcança. Uma linha azul está indicando a região de onde foi feito o perfil da imagem. A Figura 5.13. b) mostra o perfil retirado da imagem, em um gráfico de distância percorrida (eixo das abscissas) e tons de

cinza da região marcada na imagem (eixo das ordenadas). A profundidade máxima do sinal é medida até iniciar o ruído (sinal em paralelo ao longo da abscissa).

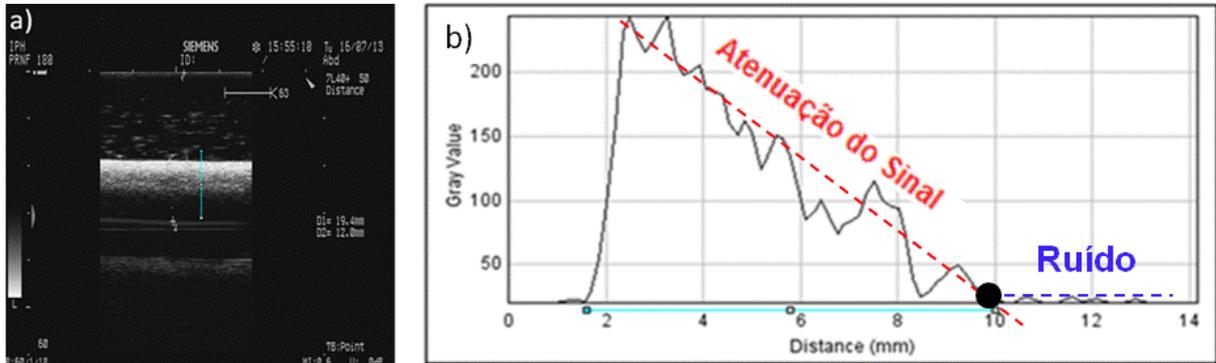


Figura 5.13. Em a) Imagem ecográfica feita a partir do material RPNF sedimentado e em b) Gráfico da distância por tons de cinza da imagem, representada pela linha em azul na imagem a).

As Tabelas 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 mostram os valores obtidos nos testes de profundidade máxima de visualização. Conforme se pode notar os materiais com grânulos menores refletem o sinal do feixe acústico com mais eficiência, devido a isso, forma-se uma interface bastante ecogênica e com pequena profundidade de visualização. A medida que os materiais são testados com granulometrias maiores a profundidade de visualização também aumenta e a interface fica mais anecóica.

Tabela 5.8. Valores de penetração máxima do sinal Carvão 205 (180-250 μm).

CARVÃO 205 (180-250 μm)				
Medidas	Espessura de CARVÃO 205 (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,20	5,00	-	-
2	1,75	5,00	1,45	1,87
3	3,00	5,00	1,47	1,90
4	3,00	5,00	1,46	1,89
5	3,00	5,00	1,56	2,01
Média 5,0 MHz:			1,49	1,92 \pm 0,07
1	1,20	7,50	-	-
2	1,75	7,50	1,26	1,63
3	3,00	7,50	1,20	1,55
4	3,00	7,50	1,21	1,56
5	3,00	7,50	1,26	1,63
Média 7,5 MHz:			1,23	1,59 \pm 0,04

Tabela 5.9. Valores de penetração máxima do sinal Carvão 210 µm, areia (<180 µm), areia (180-250 µm) e balotine (<180 µm)

CARVÃO 210 (µm)				
Medidas	Espessura de CARVÃO 210 (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	2,80	5,00	1,85	2,05
2	2,90	5,00	1,97	2,18
3	3,60	5,00	1,53	1,70
Média 5,0 MHz:			1,78	1,97 ± 0,25
1	2,80	7,50	1,48	1,34
2	2,90	7,50	0,85	0,76
3	3,60	7,50	0,78	0,70
Média 7,5 MHz:			1,04	0,93 ± 0,43

AREIA (<180 µm)				
Medidas	Espessura de AREIA (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,10	5,00	1,00	1,06
2	1,60	5,00	1,30	1,38
3	2,40	5,00	1,25	1,33
Média 5,0 MHz:			1,18	1,26 ± 0,17
1	1,10	7,50	0,94	1,00
2	1,60	7,50	1,02	1,08
3	2,40	7,50	1,12	1,19
Média 7,5 MHz:			1,03	1,09 ± 0,09

AREIA (180-250 µm)				
Medidas	Espessura de AREIA (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,05	5,00	1,03	1,04
2	1,95	5,00	1,14	1,15
3	2,95	5,00	1,15	1,16
Média 5,0 MHz:			1,11	1,11 ± 0,07
1	1,05	7,50	1,07	1,08
2	1,95	7,50	1,08	1,09
3	2,95	7,50	1,08	1,09
Média 7,5 MHz:			1,08	1,08 ± 0,01

BALOTINE (<180 µm)				
Medidas	Espessura de BALOTINE (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,50	5,00	1,43	1,54
2	1,80	5,00	1,52	1,64
3	3,10	5,00	1,43	1,54
Média 5,0 MHz:			1,46	1,57 ± 0,06
1	1,50	7,50	1,28	1,38
2	1,80	7,50	1,39	1,50
3	3,10	7,50	1,24	1,34
Média 7,5 MHz:			1,30	1,40 ± 0,08

Tabela 5.10. Valores de penetração máxima do sinal, calcário (<180 µm), RP (<180 µm), RP (180-250 µm) e RPNF (<180 µm).

CALCÁRIO (<180 µm)				
Medidas	Espessura de CALCÁRIO (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,40	5,00	1,20	1,29
2	2,45	5,00	0,76	0,82
3	2,90	5,00	0,58	0,62
Média 5,0 MHz:			0,85	0,91 ± 0,34
1	1,40	7,50	1,12	1,20
2	2,45	7,50	0,70	0,75
3	2,90	7,50	0,61	0,65
Média 7,5 MHz:			0,81	0,87 ± 0,29

RP (<180 µm)				
Medidas	Espessura de RP (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	0,90	5,00	0,79	0,87
2	1,20	5,00	0,89	0,97
3	1,30	5,00	0,79	0,87
Média 5,0 MHz:			0,83	0,90 ± 0,06
1	0,90	7,50	0,76	0,83
2	1,20	7,50	0,80	0,88
3	1,30	7,50	0,83	0,91
Média 7,5 MHz:			0,80	0,87 ± 0,04

RP (180-250 µm)				
Medidas	Espessura de RP (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,00	5,00	0,78	0,81
2	1,10	5,00	0,92	0,96
3	1,20	5,00	0,95	1,00
Média 5,0 MHz:			0,88	0,92 ± 0,10
1	1,00	7,50	0,65	0,68
2	1,10	7,50	0,71	0,75
3	1,20	7,50	0,79	0,83
Média 7,5 MHz:			0,72	0,75 ± 0,08

RPNF (<180µm)				
Medidas	Espessura de RPNF (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,30	5,00	0,85	0,90
2	2,30	5,00	0,66	0,70
3	2,80	5,00	0,83	0,88
Média 5,0 MHz:			0,78	0,83± 0,09
1	1,30	7,50	0,76	0,80
2	2,30	7,50	0,59	0,62
3	2,80	7,50	0,66	0,70
Média 7,5 MHz:			0,67	0,71± 0,09

Tabela 5.11. Valores de penetração máxima do sinal do RPNF (180-250 μm), RPNF (médio), GPMMA (<180 μm) e GPMMA (180-250 μm).

RPNF (180-250 μm)				
Medidas	Espessura de RPNF (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,30	5,00	0,83	0,70
2	2,60	5,00	0,80	0,68
3	3,00	5,00	0,86	0,55
Média 5,0 MHz:			0,83	0,64 ± 0,08
1	1,30	7,50	0,63	0,45
2	2,60	7,50	0,74	0,50
3	3,00	7,50	0,88	0,45
Média 7,5 MHz:			0,75	0,47 ± 0,03

RPNF (médio)				
Medidas	Espessura de RP (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	2,00	2,00	5,00	0,83
2	2,50	2,50	5,00	0,80
2	2,80	2,80	5,00	0,86
Média 5,0 MHz				0,86 ± 0,03
1	2,00	7,50	0,63	0,65
2	2,50	7,50	0,74	0,76
3	2,80	7,50	0,88	0,90
Média 7,5 MHz				0,77 ± 0,13

GPMMA (<180 μm)				
Medidas	Espessura de GPMMA (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,20	5,00	0,75	0,78
2	1,80	5,00	0,72	0,75
3	2,40	5,00	0,73	0,77
Média 5,0 MHz:			0,73	0,77 ± 0,02
1	1,20	7,50	0,71	0,75
2	1,80	7,50	0,70	0,74
3	2,40	7,50	0,72	0,76
Média 7,5 MHz:			0,71	0,75 ± 0,01

GPMMA (180-250 μm)				
Medidas	Espessura de GPMMA (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	0,90	5,00	0,60	0,60
2	1,40	5,00	0,64	0,64
3	3,00	5,00	0,71	0,71
Média 5,0 MHz:			0,65	0,65 ± 0,05
1	0,90	7,50	0,67	0,67
2	1,40	7,50	0,69	0,69
3	3,00	7,50	0,71	0,71
Média 7,5 MHz:			0,69	0,69 ± 0,02

Tabela 5.12. Valores de penetração máxima do sinal do GPMMA (médio), PMMA (<180 µm) e PMMA (180-250 µm).

GPMMA (médio)				
Medidas	Espessura de GPMMA (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,5	5,00	0,82	0,83
2	2,0	5,00	0,85	0,86
3	2,5	5,00	0,87	0,88
Média 5,0 MHz:			0,85	0,86± 0,03
1	1,5	7,50	0,90	0,91
2	2,0	7,50	0,90	0,91
3	2,5	7,50	0,91	0,93
Média 7,5 MHz:			0,90	0,92± 0,01

PMMA (<180µm)				
Medidas	Espessura de PMMA (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	0,70	5,00	0,56	0,61
2	1,80	5,00	0,67	0,74
3	2,70	5,00	1,14	0,90
Média 5,0 MHz:			0,79	0,75± 0,14
1	0,70	7,50	0,52	0,57
2	1,80	7,50	0,51	0,56
3	2,70	7,50	0,75	0,82
Média 7,5 MHz:			0,59	0,65± 0,15

PMMA (180-250µm)				
Medidas	Espessura de PMMA (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,70	5,00	0,74	0,76
2	2,30	5,00	0,62	0,63
3	2,30	5,00	0,51	0,52
Média 5,0 MHz:			0,63	0,64± 0,12
1	1,7	7,50	0,47	0,48
2	2,30	7,50	0,85	0,86
3	2,30	7,50	0,46	0,47
Média 7,5 MHz:			0,60	0,60± 0,23

Tabela 5.13. Valores de penetração máxima do sinal do e PMMA (médio)

PMMA (médio)				
Medidas	Espessura de PMMA (cm)	Frequência (MHz)	Profundidade (cm)	Profundidade corrigida (cm)
1	1,50	5,00	0,53	0,53
2	2,00	5,00	1,03	1,03
2	2,50	5,00	0,53	0,53
Média 5,0 MHz			0,69	0,79± 0,29
1	1,50	7,50	0,33	0,33
2	2,00	7,50	0,86	0,86
3	2,50	7,50	0,53	0,53
Média 7,5 MHz			0,57	0,58± 0,27

5.5. Visualização da Topografia de Modelos Físicos

A Figura 5.14 (no detalhe) apresenta um esquema do modelo físico com um objeto em forma de degraus usado para análise de topografia de uma amostra de carvão 205 que foi sedimentada. Na imagem ecográfica, os degraus estão representados pela linha verde e ao fundo uma imagem em *Modo B*, obtida da montagem de cinco ecografias feitas com os mesmos parâmetros do modelo pode ser observada. As linhas azuis indicam onde foram unidas as ecografias. A topografia do modelo pode ser vista claramente.

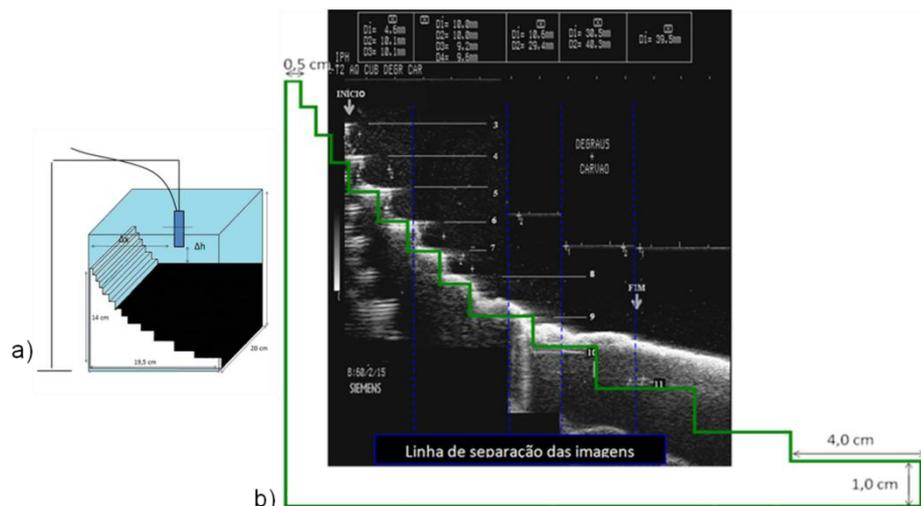


Figura 5.14. a) Representação do modelo físico b) Montagem de cinco ecografias para análise de topografia de superfície.

Na Tabela 5.14 são apresentados os valores médios de velocidade de propagação, apresentados anteriormente nas Tabelas 5.3 a 5.7, e profundidade máxima de visualização, nas Tabelas 5.8 a 5.13.

Tabela 5.14. Dados obtidos dos materiais quanto a velocidade de propagação, profundidade máxima de sinal e contraste.

Material	Velocidade de Propagação (m/s)	Profundidade Máxima (cm)	
		$f_1(5,0 \text{ MHz})$	$f_2(7,5 \text{ MHz})$
Carvão 205 (<250 μm)	1989 \pm 74	1,92 \pm 0,07	1,59 \pm 0,04
Carvão 210 (400-1500 μm)	1705 \pm 45	1,97 \pm 0,25	1,15 \pm 0,43
Calcário (<180 μm)	1653 \pm 38	0,91 \pm 0,34	0,87 \pm 0,29
Areia (quartzo) (<180 μm)	1634 \pm 73	1,26 \pm 0,17	1,09 \pm 0,09
Areia (quartzo) (180-250 μm)	1532 \pm 38	1,11 \pm 0,07	1,08 \pm 0,01
Balotina (vidro) (<180 μm)	1660 \pm 97	1,57 \pm 0,06	1,40 \pm 0,08
RP (<180 μm)	1686 \pm 146	0,90 \pm 0,06	0,87 \pm 0,04
RP (180-250 μm)	1613 \pm 42	0,92 \pm 0,10	0,75 \pm 0,08
RP (400-1500 μm)	-	-	-
RPNF (<180 μm)	1628 \pm 51	0,80 \pm 0,09	0,71 \pm 0,09
RPNF (180-250 μm)	1614 \pm 36	0,64 \pm 0,08	0,47 \pm 0,03
RPNF (400-1500 μm)	1591 \pm 20	0,86 \pm 0,03	0,77 \pm 0,13
GPMMA (<180 μm)	1621 \pm 27	0,77 \pm 0,02	0,75 \pm 0,01
GPMMA (180-250 μm)	1539 \pm 29	0,65 \pm 0,05	0,69 \pm 0,02
GPMMA (400-1500 μm)	1566 \pm 45	0,86 \pm 0,03	0,92 \pm 0,01
PMMA (<180 μm)	1681 \pm 141	0,75 \pm 0,14	0,65 \pm 0,15
PMMA (180-250 μm)	1559 \pm 21	0,64 \pm 0,12	0,60 \pm 0,23
PMMA (400-1500 μm)	1535 \pm 42	0,70 \pm 0,29	0,58 \pm 0,27

5.6. Velocidade de Propagação Acústica obtidos no Ultrassom Industrial

As imagens dessa seção são referentes ao equipamento de ultrassom de baixa frequência, customizado para testes em modelos geológicos. A Figura 5.15 mostra as interfaces de um modelo físico similar aos elaborados para as aquisições de imagens com o ecógrafo clínico. Nela é possível ver as regiões (interesses) de onde coleta-se os dados. Os resultados de aquisição das imagens foram animadores, as interfaces submersas ficaram bem visíveis permitindo distinguir até o fundo do recipiente onde o material foi sedimentado.

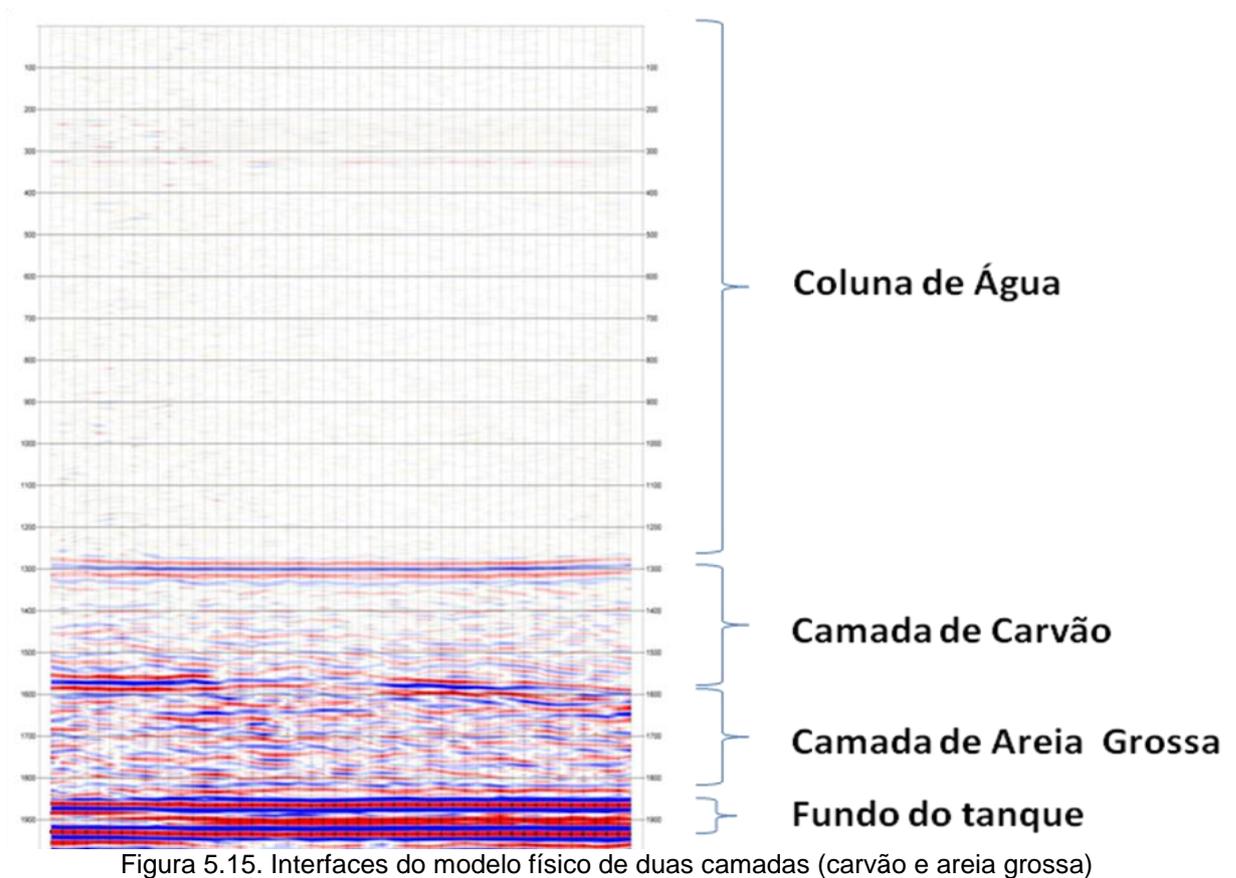


Figura 5.15. Interfaces do modelo físico de duas camadas (carvão e areia grossa)

As interfaces mostradas nas imagens são produzidas pelo somatório das amplitudes da frente de onda refletida pelo material. O aumento da amplitude do sinal nessas regiões deve-se ao coeficiente de reflexão entre os materiais que formam a interface.

Na Figura 5.16 essas interfaces serviram como regiões de referencial para obter-se o tempo de vôo da onda acústica, possibilitando o cálculo da velocidade de propagação do material sedimentado e determinar a espessura da camada.

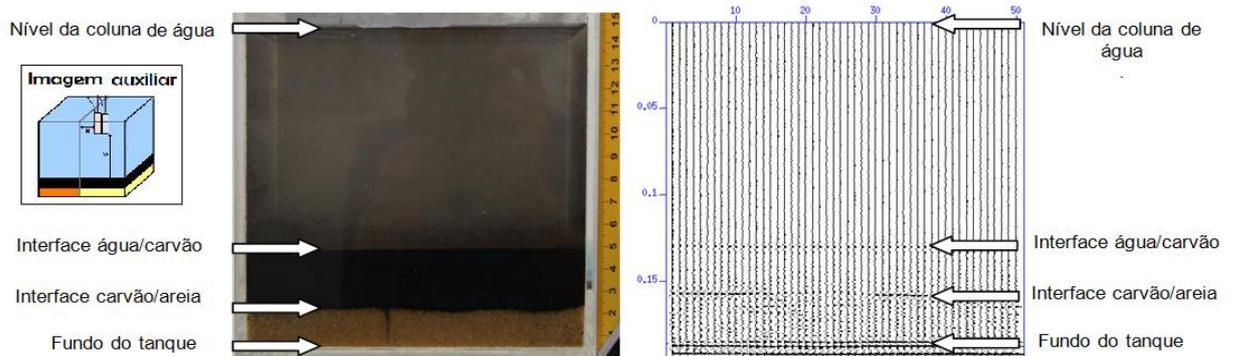
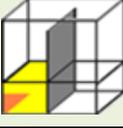
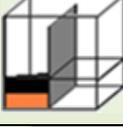
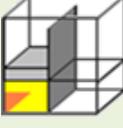
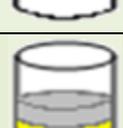
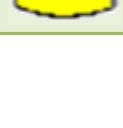


Figura 5.16. Fotografia do modelo físico da amostra de areia grossa com carvão e sismograma, feita com 50 pontos de tiro, 200 tiros por ponto, passo de 2 mm, usando uma frequência de 250 kHz e aplicados ao transdutor uma tensão de 12 V.

A Tabela 5.15 apresenta os valores obtidos de modelos com a arquitetura de camadas planas. Os resultados revelaram uma congruência com os valores de velocidade de propagação obtidos com o ecógrafo clínico para o carvão 205 e para a água. Os valores de V_p da areia e dos materiais poliméricos ficaram ~ 20% menores e possivelmente isso se deva a baixa estatística de dados obtidos.

Pode-se notar que a velocidade para o carvão 205 é de ~ 2000 m/s para a água ~ 1500 m/s. Os demais materiais apresentam e uma diferença de valor maior, se comparado ao equipamento clínico, o que pode ser devido ao pequeno número de imagens adquiridas por problemas de logística e tempo de aquisição da imagens.

Tabela 5.15. Valores de velocidade de propagação nos materiais usando ultrassom de baixa frequência 250 kHz aplicado nos tanques de acrílico.

Frequência (kHz)	Material	Fotografia espessura (m)	Δt (10^{-7} s)	Modelo físico	Velocidade propagação (m/s)
250	Água	0,097	1275		1521,6
250	Carvão 205	0,025	250		2000,0
250	Areia grossa	0,015	300		1000,0
250	Água	0,090	1200		1500,0
250	Carvão 205	0,024	240		2000,0
250	Areia fina	0,023	340		1352,9
250	Água	0,087	1180		1471,2
250	Areia fina	0,009	140		1342,9
250	Areia grossa	0,021	360		1177,8
250	Água	0,086	1100		1570,9
250	Carvão 205	0,046	450		2026,7
250	Areia grossa	0,017	250		1360,0
250	Água	0,088	1170		1504,3
250	Poliéster	0,019	230		1617,4
250	Areia fina	0,011	170		1294,1
250	Areia grossa	0,022	380		1168,4
250	Água	0,060	800		1500,0
250	Areia Fina	0,020	300		1333,3
250	Poliéster SB	0,020	330		1212,1
250	Água	0,064	850		1505,9
250	Poliéster NF	0,020	200		2000,0
250	Areia Fina	0,020	290		1379,3

5.6.1. Efeito da Granulometria no Contraste entre Interfaces

As Figuras 5.17 e 5.18 foram adquiridas de modelos físicos montados com amostras de areia fina, areia grossa e carvão 205 sedimentados. Na Figura 5.17, analisando as imagens e associando à granulometria, é possível observar picos de amplitude mais intenso na interface (2) carvão/areia fina do que na mesma interface do carvão/areia grossa da Figura 5.16, pois o espalhamento causado pelas partículas maiores resulta em diversas frentes de onda, ocasionando a diminuição do coeficiente de reflexão, que reduz o sinal.

Nota-se também que a interface (1) da Figura 5.17 a) é mais marcada por reflexões, quando comparada com a mesma interface da Figura 5.18, embora o carvão 205 forme, com a água, a mesma interface nos dois casos. Isso pode ser explicado, já que a areia grossa reflete mais difusamente o sinal acústico do que a areia fina (espalhamento especular), favorecendo a formação de reflexões, que aparecem na imagem de maneira mais intensa.

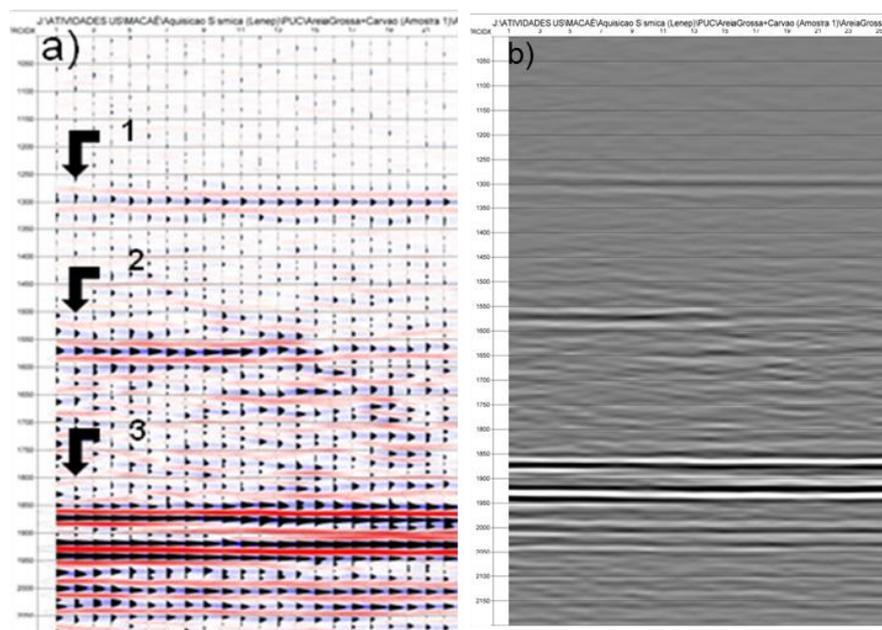


Figura 5.17. a) Interface de um modelo de Carvão e areia grossa, onde (1) é a interface água/carvão; (2) é a interface carvão /areia grossa e (3) é a interface areia grossa/fundo. b) Imagem pós-processada por interpolação

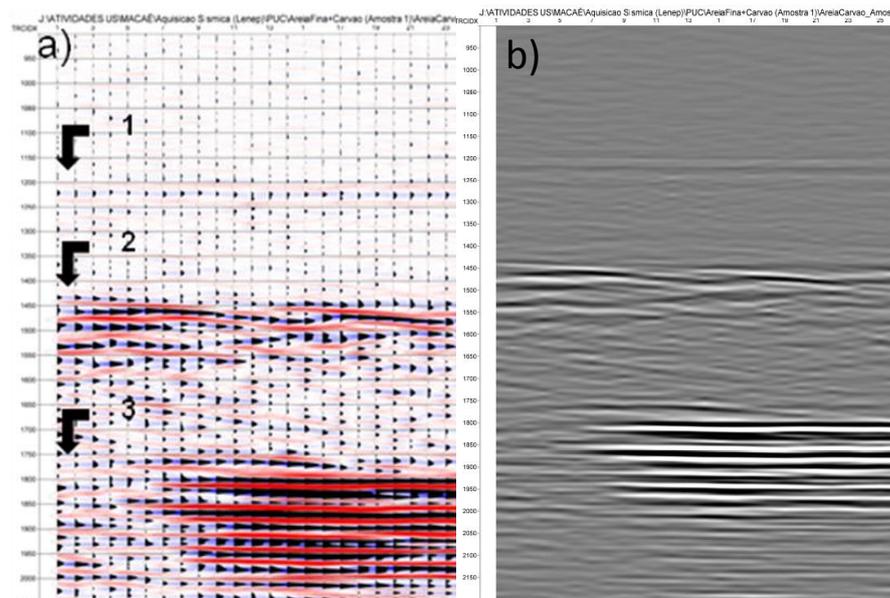


Figura 5.18. a) Interfaces de um modelo de Carvão e areia fina, onde (1) é a interface água/carvão; (2) é a interface carvão/areia fina e (3) é a interface areia fina/fundo. b) Imagem pós-processada por interpolação.

5.6.2. Análise de Topografia de Superfície

Os resultados foram animadores tanto nas interfaces submersas planas, como também, para a análise de topografia de superfície.

Na Figura 5.19 a) mostra-se a sobreposição da fotografia do modelo experimentado com o sismograma obtido no equipamento. Na Figura 5.18 b) a mostra a visualização da topografia de superfície e a estrutura interna do modelo. A imagem é bem representativa e permite sugerir onde existem camadas de sedimentos diferentes, que pode ser comprovado pela fotografia do modelo ao lado.

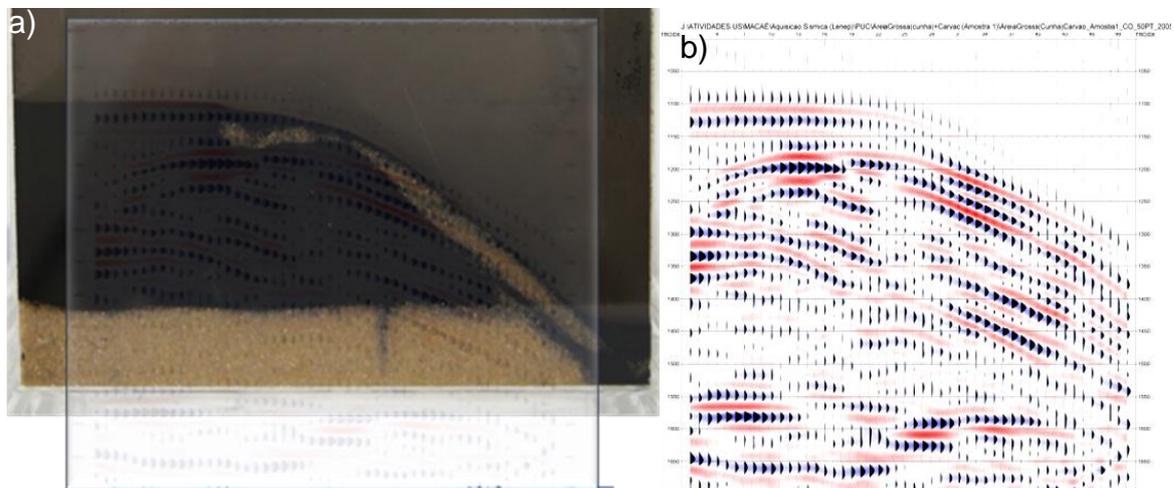


Figura 5.19. Fotografia do modelo físico da amostra de areia grossa com carvão e sismograma, feita com 50 pontos de tiro, 200 tiros por ponto, passo de 2 mm, usando uma frequência de 250 kHz e aplicados ao transdutor uma tensão de 12 V.

5.7. Contraste Acústico dos Diferentes Materiais

5.7.1. Contraste em Duas Camadas Sobrepostas

Nas Figuras 5.20, 5.21 e 5.21 podemos observar a presença de múltiplas interfaces, representando o encontro de dois materiais com impedâncias acústicas diferentes. A presença de subcamadas de sedimentos em meio aquoso pode ser evidenciada pela diferença de contraste obtido nas imagens ecográficas em *Modo B* ou *Modo A*. Pelo contraste, associado à profundidade máxima visual, pode-se estimar quais são as características (tamanho e morfologia) do grão e qual é a espessura da camada sedimentada no modelo. Nota-se que na Figura 5.21 não existe diferenciação entre as interfaces dos materiais devido a granulometria da areia grossa, que dispersa o sinal acústico.

Estamos utilizando, para obter as imagens ecográficas, um feixe ultrassônico de ondas mecânicas, portanto é natural que ao longo da linha de propagação este sinal sofra atenuação. Assim, testes com apenas uma camada podem esclarecer ainda mais a questão do contraste, ver Seção 5.7.3.

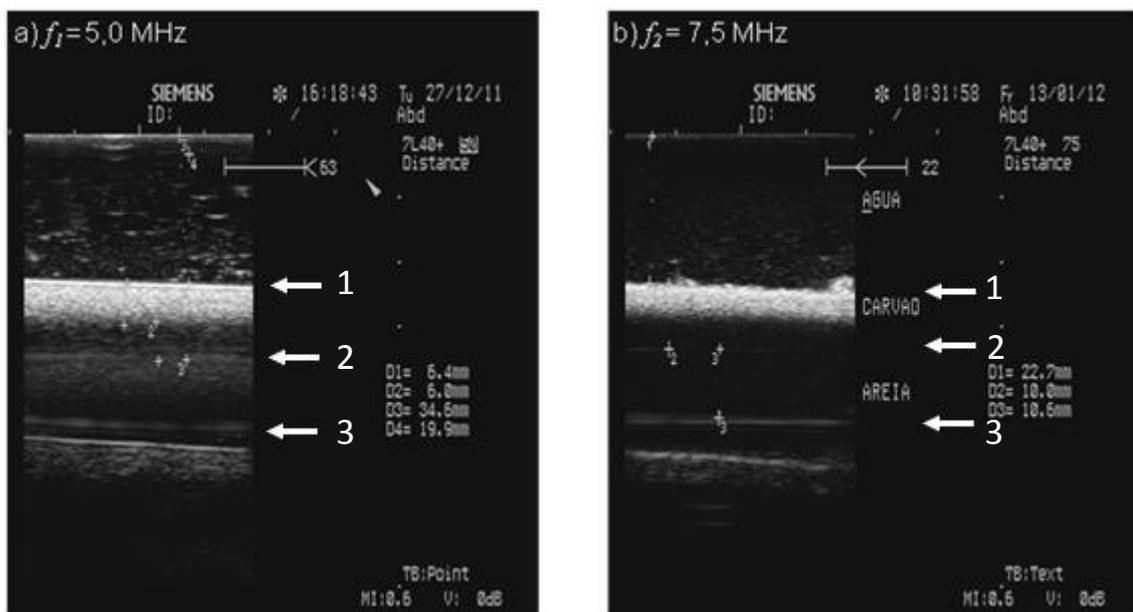


Figura 5.20. a) Imagem de uma amostra heterogênea de carvão e areia depositados em um béquer onde se observa diferenças de contraste devido aos materiais utilizados para as frequências de 5 e 7,5 MHz em a) e b), respectivamente.

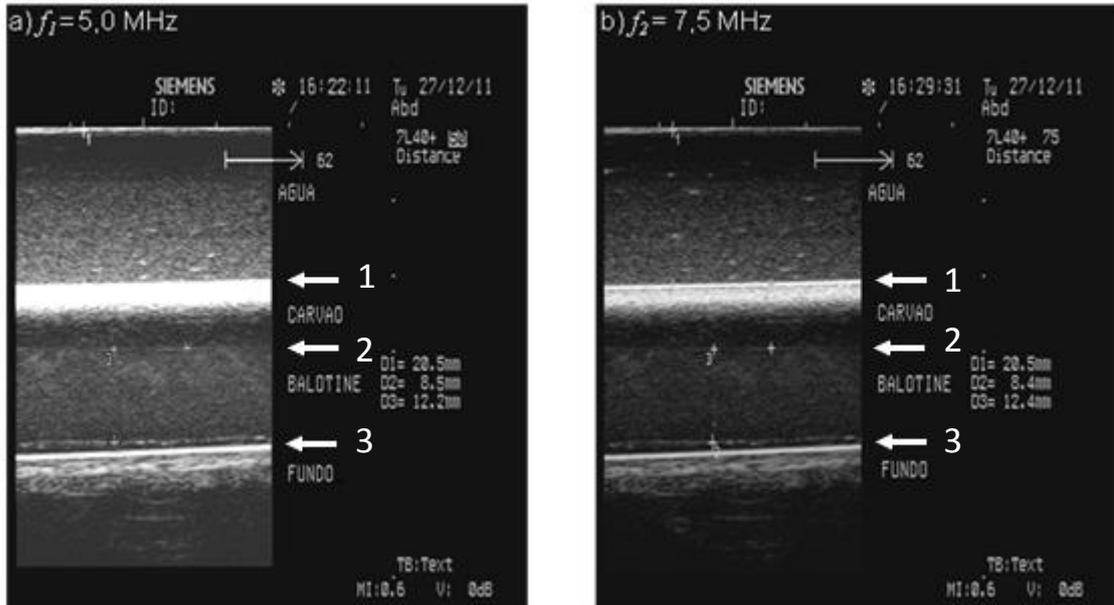


Figura 5.21 Imagem de uma amostra heterogênea de carvão e balotine depositados em um béquer, onde se observa diferenças de contraste devido aos materiais utilizados para as frequências de 5 e 7,5 MHz em a) e b), respectivamente.

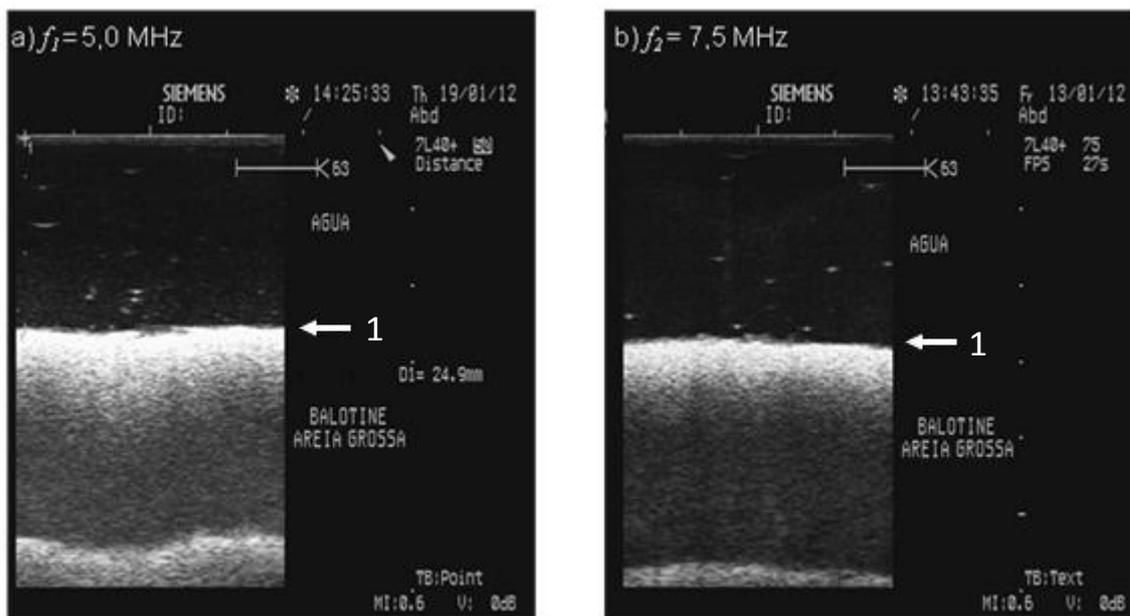


Figura 5.22 Imagem de uma amostra heterogênea de balotine e areia grossa depositados em um béquer, onde não há diferença de contraste devido aos materiais utilizados para as frequências de 5 e 7,5 MHz em a) e b), respectivamente.

5.7.2. Contraste de Duas Camadas de Sedimento com Três Materiais Diferentes Justapostos

As Figuras 5.23 até 5.27 apresentam os resultados de contraste obtidos com os modelos físicos montados para imagear as amostras lado a lado com apenas uma camada. A análise sugere que materiais com morfologia granular esférica ou

arredondadas são bastante ecogênicos como é o caso da areia e do balotine. Esses dois materiais também têm uma grande massa específica, se comparado ao carvão, assim, foram sedimentados primeiro para garantirem a formação de interfaces homogêneas. As granulometrias menores que 180 μm mostram-se bastante reflexivas de um modo geral, já entre 180 e 250 μm começam a apresentar uma diminuição desse fator.

As discordâncias entre os valores de $P_{\text{máx}}$ da Tabela 5.14 e do observado nas imagens dessa Seção devem-se a granulometria maior do balotine usado nesses modelos e ao fato do carvão não estar lavado nem peneirado, pois existe, nesse caso, uma larga faixa granulométrica presente.

No preparo de modelos usando o carvão, as partículas menores levam mais tempo para se acomodarem, criando uma camada superficial com granulometria fina (<180 μm) que é altamente refletora e causa atenuação brusca do sinal.

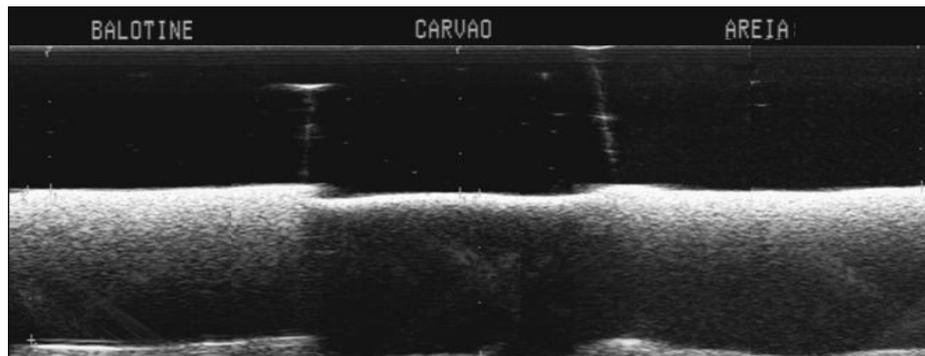


Figura 5.23. Imagem mostrando a diferença de contraste dos materiais balotine, carvão e areia.

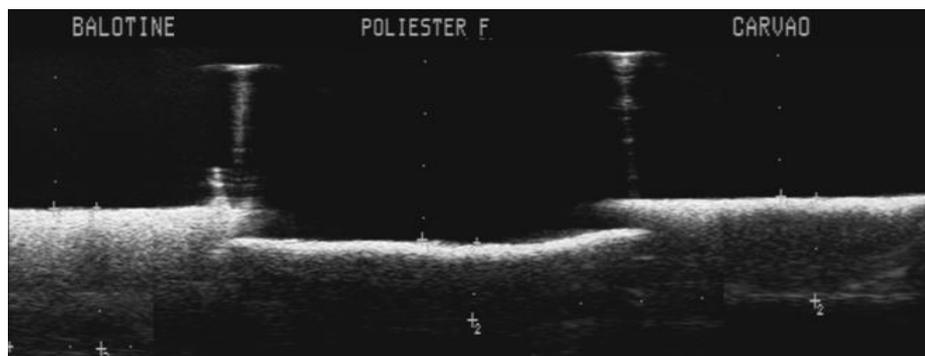


Figura 5.24. Imagem mostrando a diferença de contraste dos materiais balotine, poliéster fino e carvão.

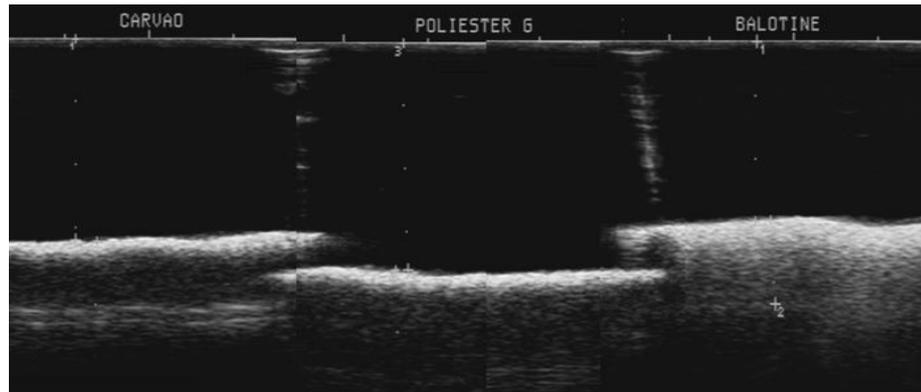


Figura 5.245. Imagem mostrando a diferença de contraste dos materiais carvão, poliéster grosso e balotine.

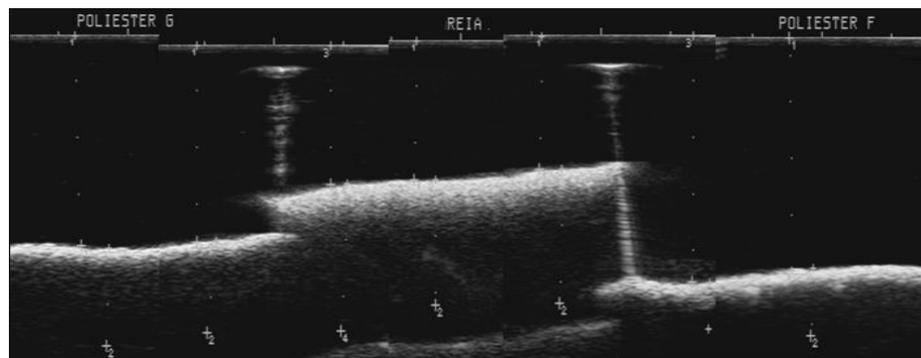


Figura 5.26. Imagem mostrando a diferença de contraste dos materiais poliéster grosso, areia e poliéster fino.

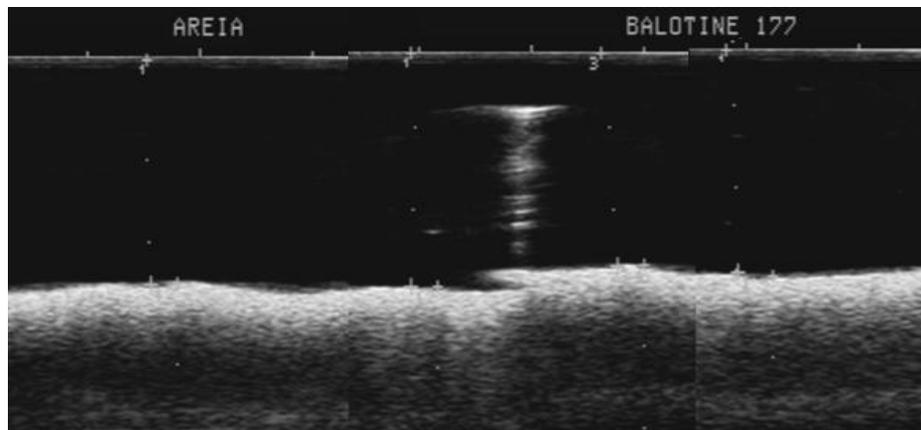


Figura 5.27. Imagem mostrando a diferença de contraste dos materiais areia e balotine.

5.7.3. Contraste de Uma Camada de Sedimento Variando o Tipo de Material e Granulometria

Na Figura 5.28 uma fotografia apresenta o modelo físico utilizado. A investigação a respeito do contraste para diferentes materiais com a mesma granulometria e morfologia de grãos, não apresentou diferença, o que sugere que este aspecto esteja ligado ao tamanho granular.

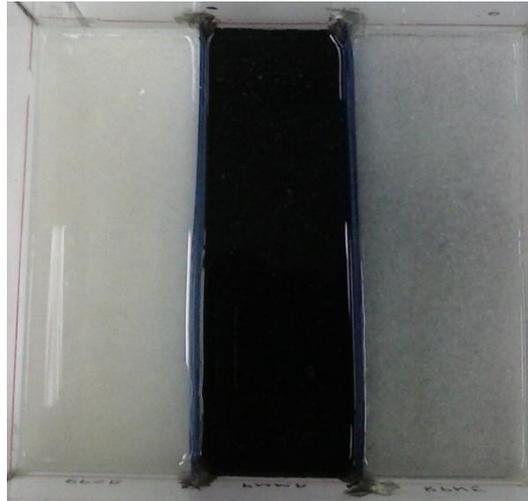


Figura 5.28. Fotografia do modelo físico mostrando diferentes materiais com a mesma granulometria. (média $1000\mu\text{m}$)

Na Figura 5.29 uma imagem ecográfica mostra a semelhança de contraste ecogênico entre a RPSB, GPMMA e RPNF na faixa granulométrica de 500 a $1500\mu\text{m}$ com predominância para $750\mu\text{m}$.

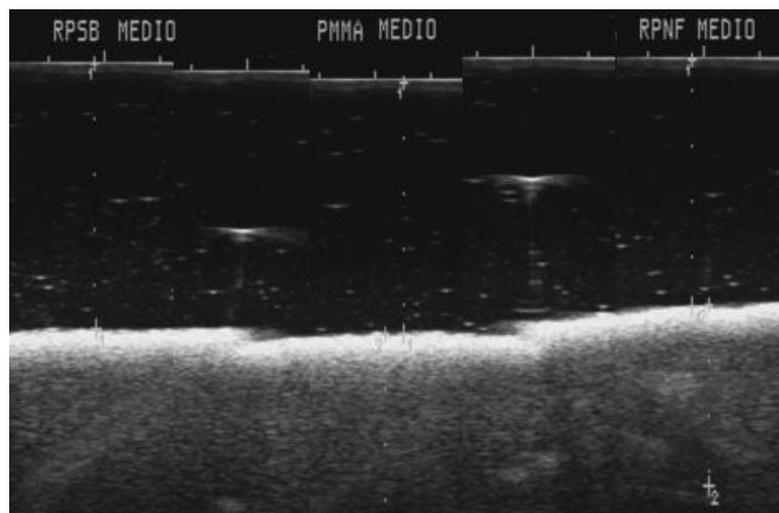


Figura 5.29. Imagem mostrando o contraste de diferentes materiais com a mesma granulometria. (média $1000\mu\text{m}$)

A Figura 5.30 a) apresenta uma fotografia do modelo físico usado para os testes de contraste e a Figura 5.30 b) mostra como estão dispostos os materiais por tipo e tamanho granular conforme indicado pelas setas.

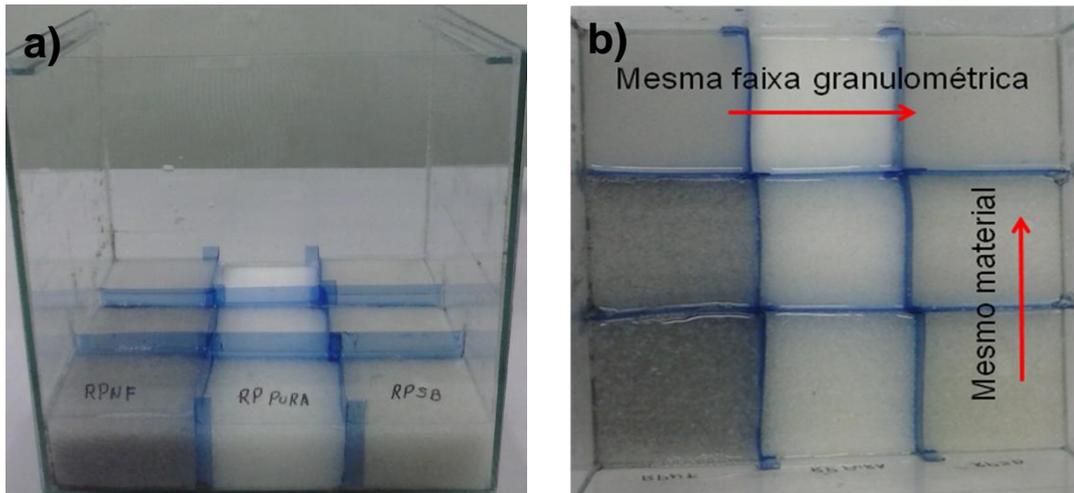


Figura 5.30. Fotografia a) vista frontal do modelo físico mostrando diferentes materiais com diferentes granulometria. b) vista de cima do modelo físico mostrando diferentes materiais com diferentes granulometria.

As Figuras 5.31, 5.32 e 5.33 apresentam as imagens correspondentes ao contraste de uma camada de sedimento com três diferentes granulometrias para o mesmo material. Dessa observação é possível sugerir que a diferença de tamanho granular com a mesma morfologia, revela uma certa diferença de contraste e consequentemente a $P_{máx}$ acaba, como já mencionado, diminuindo quanto menor é o grânulo e fica mais ecogênico.

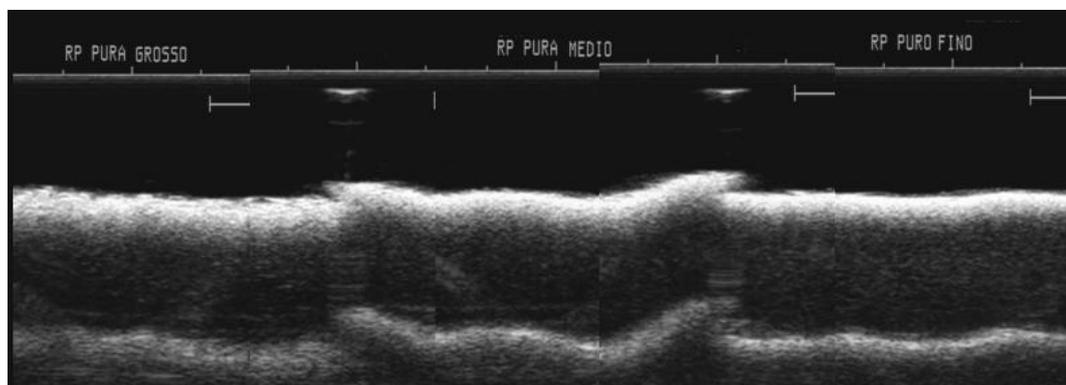


Figura 5.31. Imagem mostrando o mesmo materiais com diferentes granulometria. (Resina poliéster pura)

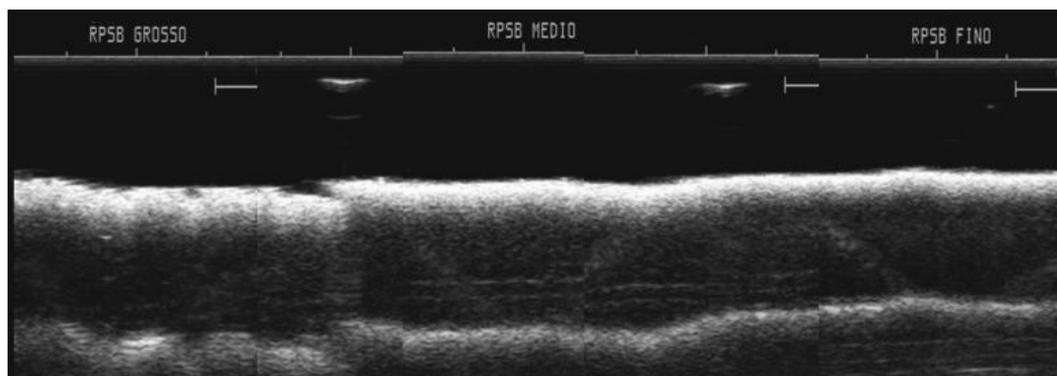


Figura 5.32. Imagem mostrando o mesmo materiais com diferentes granulometria. (Resina poliéster com sulfato de bário)

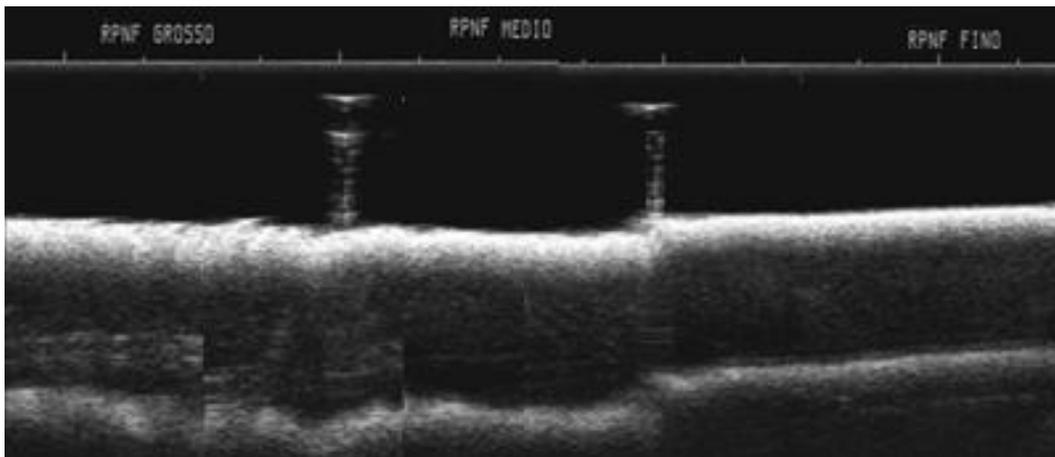


Figura 5.33. Imagem mostrando o mesmo materiais com diferentes granulometria. (Resina poliéster com negro de fumo).

As Figuras 5.34, 5.35 e 5.36 apresentam as imagens correspondentes ao contraste de uma camada de sedimento com a mesma granulometria para diferentes materiais.

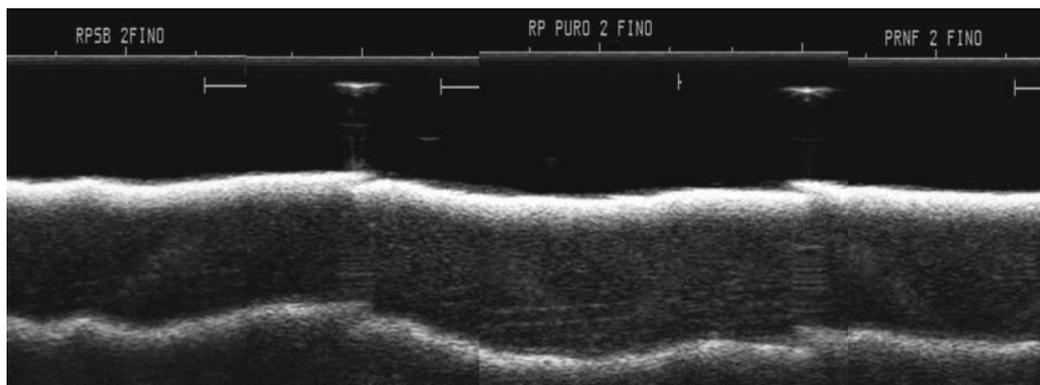


Figura 5.34. Imagem mostrando diferentes materiais com a mesma granulometria. (fino250-425 μ m)

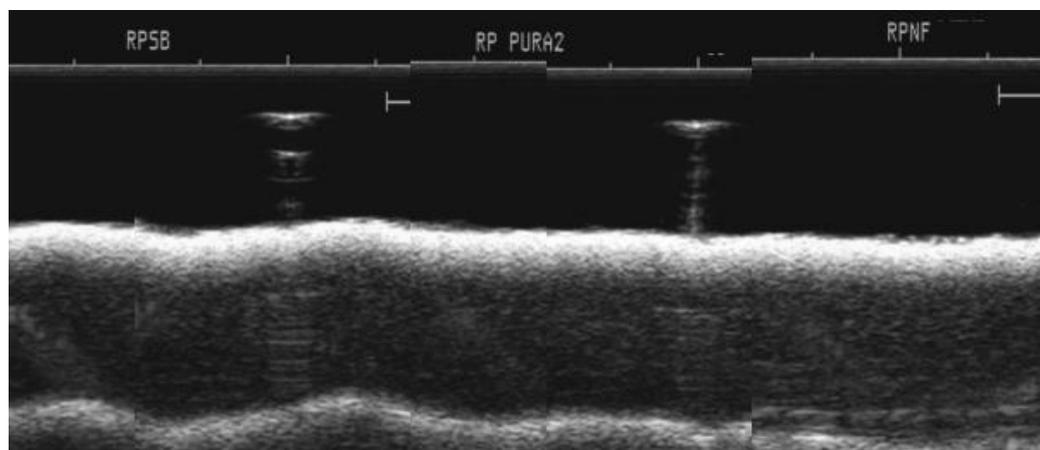


Figura 5.35. Imagem mostrando diferentes materiais com a mesma granulometria. (médio1000 μ m)

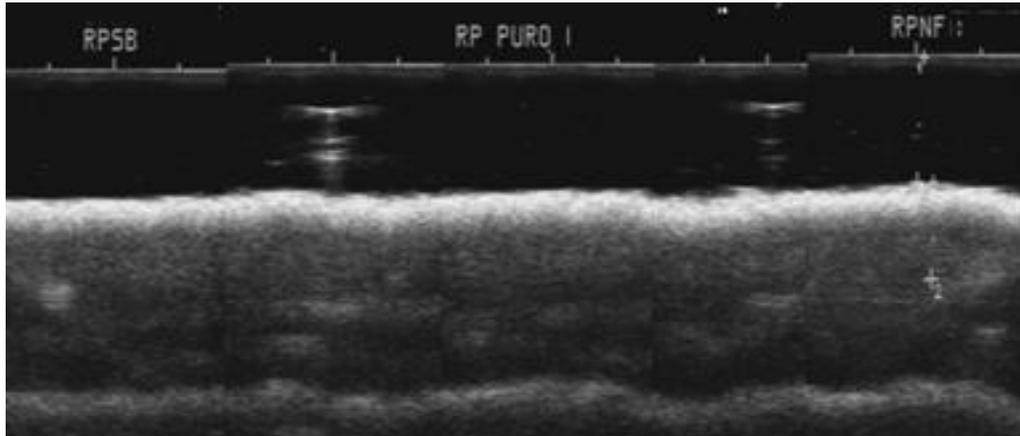


Figura 5.36. Imagem mostrando diferentes materiais com a mesma granulometria. (grosso2000 μm)

Através das análises fica evidente que ao se usar a mesma metodologia de imageamento, porém com materiais diferentes e da mesma faixa granulométrica não há diferença de contraste ou $P_{m\acute{a}x}$.

Cabe lembrar que as amostras empregadas nesse teste foram lavadas e estão praticamente livres de partículas menores, que formar uma camada de material mais fina na superfície sedimentada, pois fica mais tempo em suspensão na água, enquanto partículas mais pesadas acomodam-se antes.

5.8. Discussão dos Valores de Velocidade de Propagação, Contraste e Profundidade

Na Tabela 5.16 são apresentados os valores médios de velocidade de propagação, apresentados nas Tabelas 5.3 a 5.7, e profundidade máxima de visualização, apresentados nos Tabelas 5.8 a 5.15.

Tabela 5.16. Dados obtidos dos materiais quanto a velocidade de propagação, profundidade máxima de sinal e contraste.

Material	Velocidade de Propagação Média (m/s)	Velocidade de Propagação (m/s)		Profundidade Máxima (cm)		Contraste
		f_1 (5,0 MHz)	f_2 (7,5 MHz)	f_1 (5,0 MHz)	f_2 (7,5 MHz)	
Carvão 205 (<250 μ m)	1989 \pm 74	1973 \pm 50,10	2005 \pm 102,36	1,92 \pm 0,07	1,59 \pm 0,04	Pouco ecogênico
Carvão 210	1705 \pm 45	1696 \pm 42,75	1713 \pm 55,24	1,97 \pm 0,25	1,15 \pm 0,43	
Calcário (<180 μ m)	1653 \pm 38	1651 \pm 9,40	1654 \pm 59,74	0,91 \pm 0,34	0,87 \pm 0,29	
Areia (quartzo) (<180 μ m)	1634 \pm 73	1622 \pm 62,55	1647 \pm 94,00	1,26 \pm 0,17	1,09 \pm 0,09	Grande diferença de contraste; Bastante ecogênico
Areia (quartzo) (180-250 μ m)	1532 \pm 38	1534 \pm 45,50	1531 \pm 37,98	1,11 \pm 0,07	1,08 \pm 0,01	
Balotina (vidro) (<180 μ m)	1660 \pm 97	1639 \pm 78,23	1680 \pm 126,97	1,57 \pm 0,06	1,40 \pm 0,08	
RP (<180 μ m)	1686 \pm 146	1703 \pm 130,97	1669 \pm 187,69	0,90 \pm 0,06	0,87 \pm 0,04	Pouco ecogênico
RP (180-250 μ m)	1613 \pm 42	1629 \pm 45,28	1599 \pm 40,16	0,92 \pm 0,10	0,75 \pm 0,08	
RP médio	-	-	-	-	-	
RPNF (<180 μ m)	1628 \pm 51	1656 \pm 41,78	1601 \pm 50,28	0,80 \pm 0,09	0,71 \pm 0,09	
RPNF (180-250 μ m)	1614 \pm 36	1621 \pm 19,69	1608 \pm 53,67	0,64 \pm 0,08	0,47 \pm 0,03	
RPNF médio	1591 \pm 20	1592 \pm 5,01	1591 \pm 30,92	0,86 \pm 0,03	0,77 \pm 0,13	
GPMMA (<180 μ m)	1621 \pm 27	1629 \pm 33,09	1614 \pm 25,26	0,77 \pm 0,02	0,75 \pm 0,01	Pouco ecogênico
GPMMA (180-250 μ m)	1539 \pm 29	1535 \pm 8,80	1543 \pm 44,92	0,65 \pm 0,05	0,69 \pm 0,02	
GPMMA médio	1566 \pm 45	1553 \pm 57,69	1580 \pm 34,90	0,86 \pm 0,03	0,92 \pm 0,01	
PMMA (<180 μ m)	1681 \pm 141	1694 \pm 112,70	1668 \pm 190,25	0,75 \pm 0,14	0,65 \pm 0,15	Pouco ecogênico
PMMA (180-250 μ m)	1559 \pm 21	1556 \pm 14,34	1563 \pm 28,65	0,64 \pm 0,12	0,60 \pm 0,23	
PMMA médio	1535 \pm 42	1535 \pm 49,08	1536 \pm 44,93	0,70 \pm 0,29	0,58 \pm 0,27	

Os resultados apresentados na Tabela 5.14 representam um resumo dos valores obtidos nas Tabelas de V_P e $P_{m\acute{a}x}$. Os valores indicam que a profundidade máxima de visualizaao em 5 MHz é da ordem de 2 cm para todos os materiais utilizados. Quando a frequência é reduzida para 250 kHz a zona de visualizaao aumenta substancialmente para mais de 6 cm. Apesar da resoluao espacial decrescer com a diminuiao da frequência, devido ao aspecto pontilhado (speckle) das imagens ultrassonográficas dos depósitos, não se observa uma perda de detalhe significativa com o uso de frequências na faixa do kHz. Usando-se frequências mais baixas se consegue profundidades de visualizaao ainda maiores, tornando o método aplicável em maiores escalas. A profundidade de visualizaao também variou em funao do tamanho do grão do material sedimentado, sendo esta levemente maior em materiais com grãos maiores. Para granulometrias maiores que 180 μm , se obteve uma profundidade máxima de visualizaao da ordem de 1,27 cm para o carvão 210 e 1,10 cm para a areia. Já os compósitos de base poliméricas, da mesma faixa granulométrica, apresentaram valores em torno de 0,7 cm. Os materiais com faixas menores que 180 μm ofereceram maior dificuldade a propagaao do sinal do feixe, já que o feixe é refletido com grande eficiência.

Os cálculos de velocidade de propagaao da onda ultrassônica nos materiais mostram que ao se diminuir a granulometria, a velocidade de propagaao no sedimento aumenta levemente. O valor de velocidade de propagaao do som estimado para o carvão 205 foi de 1989 ± 74 m/s, enquanto para o carvão 210 foi de 1705 ± 45 m/s. No calcário, areia, balotina, RP, RPNF, GPMMA e PMMA com granulometria menor que 180 μm a V_p esses valores ficaram em torno de 1650 m/s. Não se observou mudanças desses valores para as frequências utilizadas, como esperado, exceto para a areia fina que apresentou uma reduao de ~ 20% dos valores em uma frequência de 250 kHz. Não foram observadas diferenças muito significativas na intensidade do sinal ultrassônico entre os diversos materiais manteve-se constante em praticamente todos os casos. Entretanto, as morfologias esféricas do balotina ou arredondadas da areia proporcionaram sinais mais intensos e favorecem o contraste entre camadas quando materiais distintos, como o carvão ou os compósitos poliméricos são usados em camadas vizinhas. A granulometria também influencia no contraste, já que grãos maiores favorecem a reflexão difusa, enquanto a maior compactaao de sedimentos de grãos menores cria condioes mais favoráveis a reflexão quase especular de maior intensidade.

6. CONCLUSÕES

Nesse trabalho o imageamento por ondas acústicas buscou identificar o comportamento de diferentes materiais (convencionais e artificiais). Para tanto, empregou-se dois equipamentos um de alta frequência e um de baixa frequência. A obtenção de valores calculados através de medidas retiradas das imagens como velocidade de propagação acústica no material, profundidade máxima de visualização alcançada pelo feixe e diferença de contraste foram úteis uma vez que o cruzamento desses valores com as características intrínsecas conhecidas dos materiais (granulometria, morfologia da partícula, massa específica e velocidade de queda) mostraram-se correlacionadas.

Os resultados obtidos mostraram que a profundidade máxima de visualização em 5,0 MHz não foi superior a 2 cm para todos os materiais utilizados. Para uma frequência de 250 kHz a zona de visualização aumenta substancialmente para mais de 6 cm. Apesar da resolução espacial decrescer com a diminuição da frequência, devido ao aspecto pontilhado (*speckle*) das imagens ultrassonográficas dos depósitos, não se observa uma perda de detalhe significativa com o uso de frequências na faixa do kHz. A profundidade de visualização variou em função da granulometria do material sedimentado, sendo levemente maior em materiais com grãos maiores. Para granulometrias maiores que 180 μm , se obteve uma profundidade máxima de visualização da ordem de 1,27 cm para o carvão 210 e 1,10 cm para a areia. Enquanto que para os compósitos de base poliméricas da mesma faixa granulométrica se obteve valores em torno de 0,7 cm. Os materiais com faixas menores que 180 μm ofereceram maior dificuldade à propagação do sinal do feixe, já que o feixe é refletido com grande eficiência.

Os cálculos de velocidade de propagação da onda ultrassônica nos materiais revelaram que ao se diminuir o tamanho do grão a velocidade de propagação no sedimento aumenta levemente. O valor de velocidade de propagação do som estimado para o carvão 205 foi de 1989 ± 74 m/s, enquanto para o carvão 210 foi de

1705±45 m/s. No calcário, areia, balotine, RP, RPNF, GPMMA e PMMA com granulometria menor que 180 µm a velocidade de propagação foi da ordem de 1650 m/s. Houve variações desses valores para as baixas frequências utilizadas, com exceção de alguns resultados como são os casos da velocidade de propagação na água e no carvão. A areia fina em 250 kHz apresentou uma redução de ~ 20%, se comparado aos resultados obtidos em alta frequência. Estes resultados pode ser devido a variações de medida do método e também ao pequeno número de imagens obtidas devido a dificuldades de deslocamento a Macaé.

Não foram observadas diferenças muito significativas na intensidade do sinal sonoro entre os diversos materiais. Contudo, as morfologias esféricas do balotine ou arredondadas da areia proporcionaram sinais mais intensos e favorecem o contraste entre camadas, quando materiais distintos como o carvão ou os compósitos poliméricos são usados em camadas vizinhas. A granulometria também influencia no contraste, já que grãos maiores favorecem a reflexão difusa, enquanto a maior compactação de sedimentos de grãos menores cria condições mais favoráveis a reflexão quase especular de maior intensidade.

As imagens bidimensionais em modo de brilho (modo B), que permite visualizar com boa resolução lateral e axial as imagens dos modelos sedimentares, permitiram extrair dados e obter resultados através de análises do comportamento acústico dos materiais. Cabe lembrar, contudo, que apesar das imagens de *Modo B* do equipamento clínico possuírem uma aparência mais agradável aos olhos, elas apresentam uma infinidade de ponderações e parâmetros estabelecidos pelo aparelho “*preset*”. Devido a isso, algumas informações que chegam ao transdutor são perdidas na conversão do sinal. Contudo para o equipamento de baixa frequência isso é minimizado, pois o sinal recebido é convertido em imagem de maneira menos parametrizada. De qualquer forma, as características dos materiais puderam ser medidas e comparadas, onde cada equipamento contribuiu de forma satisfatória.

A análise dos dados coletados e os resultados das medidas obtidas nas imagens são animadores uma vez que apresentam diferentes valores, com os quais pode-se estimar a presença de camadas que formam a estrutura interna do sedimento.

Os materiais convencionais empregados para o imageamento revelaram-se bons para o contraste como é o caso do balotine e da areia, mas o carvão e o

calcário apresentaram pontos negativos como tempo de sedimentação elevado ficando muito tempo em suspensão, o que impossibilita/prejudica seu emprego em testes visuais ou imageamento ultrassônico. Os materiais artificiais apresentaram pouca diferença de comportamento nos testes de imagem acústico, mas podem ser pigmentados para testes visuais em correntes de densidade e apresentam grandes variações de comportamento em imagens de raios x devido a mudanças nas concentrações de cargas adicionadas no momento da síntese.

No imageamento por ondas acústicas deve-se, contudo, levar em conta problemas como a reduzida profundidade de visualização para ecógrafos clínicos e a pequena área visual do transdutor, pois as imagens podem não servir para análise.

7. PERSPECTIVAS FUTURAS

Tendo em vista os resultados preliminares obtidos com o ecógrafo de baixa frequência utilizado em Macaé, torna-se oportuno a ampliação dos estudos, já que as imagens estratigráficas revelam aspectos importantes por apresentarem pouca parametrização no sinal, quando comparadas com o ecógrafo clínico.

Com base nisso, torna-se oportuno o desenvolvimento de um sistema de emissão/recepção que aperfeiçoe o imageamento por ultrassom de baixa frequência customizado para ensaios de correntes de densidade. Isso implica na otimização e na construção de transdutores específicos para a emissão e para a recepção do sinal numa faixa de frequências que possibilite a melhor relação penetração/contraste e o máximo aproveitamento do sinal detectado pelo transdutor.

Além disso, o sistema de detecção deverá ser acoplado a um mecanismo de translação graduado milimetricamente nas três dimensões (x, y e z), que permitirá uma mobilidade da configuração do mapeamento topográfico e em duas dimensões dos depósitos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MACEDO, H. C.; *et al.* Propriedades acústicas (velocidade de propagação e coeficiente de atenuação) de sedimentos marinhos coletados nas proximidades da Ilha do Cabo Frio, RJ. **Revista Brasileira de Geofísica**. v. 27(2), pp. 195-204, 2009.
- [2] BUCKINGHAM M.J. Compressional and shear wave properties of marine sediments: comparisons between theory and data. **Journal of the Acoustical Society of América**. v.117(1), pp.137-152, 2005.
- [3] NETO, A. A. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.18(3), pp. 241-256, 2000.
- [4] CWIK, M. R; *et al.* Integração de Dados Geofísicos e Geológicos em Projetos de Dutos Rígidos Submersos: Análise dos Métodos de Interferência Espacial. In: **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação: 2010, Recife**, pp. 001-006.
- [5] KNELLER, B.C.; *et al.* The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. **Sedimentology** v.47, p. 62–94, 2000.
- [6] GLADSTONE, *et al.* Experiments on bidisperse, constant volume gravity currents: Propagation and sediment deposition. **Sedimentology**. v. 45, 833–844, 1998.
- [7] OLIVEIRA, L. S. R. Ultrassom disponível em www.lucianosantarita.pro.br/ultrasom.html (acesso em 07/11/12).

- [8] CAVALEIRO, M. Neli; *et al.* **FQ 8 Sustentabilidade na Terra**. Edições Asa: São Paulo, 2007.
- [9] WHITTINGHAM, T. A. **Physics for diagnostic radiology**. Diagnostic Ultrasound. 2ª edicion. Bristol: New York , 1999. 446 p.
- [10] MACEDO, H. C. **Análise da Propagação de Ondas Compressionais (P) em Sedimentos Marinhos**. Niterói, 2006. 153p. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha). Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Brasil.
- [11] BUSHBERG, C. F., *et. al.* **The Essential Physics of Medical Imaging**. 2ª ed. Lippincott: Philadelphia, 2002, 471 p.
- [12] ANDREUCCI, R. Ensaio por Ultrassom – Aspectos Básicos. Disponível em: <http://www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/US.pdf> (acesso em 10/09/2011).
- [13] MENDES, M. R.,P. **Estudo Simulado e Experimental da Propagação do Pulso Ultrassônicos em Phantom Biológico com Tripla Camada**. Rio de Janeiro, 2011. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [14] PEIXOTO, G. C. X; *et al.* Bases Físicas da Formação da Imagem Ultrassonográfica. **Acta Veterinária Brasília**. v.4, n.1, pp 15-24, 2010.
- [15] AUGUSTO, A. Q., *et al.* Princípios Físicos da Ultrassonografia – Revisão Bibliográfica. **Arq. Ciên. Vet. Zool**, UNIPAR. v.3 (1). pp. 61-65, 2000.
- [16] SANTOS, M. H. G dos. **Desenvolvimento de Transdutores Piezelétricos de Ultrassom para a formação de Imagens**. São Paulo, 2010. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos). Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo.
- [17] BISCEGLI, C. I. Conceitos de Ultra-som. Embrapa Instrumentação Agropecuária. Universidade de São Paulo: São Carlos, 2003. 18p.

[18] CARNEVAL, R de O., *et al.* Uso das Técnicas de END: Ultra-som (TOFD e Phase Array), Radiografia, Partículas Magnéticas e ACFM na Avaliação de Juntas Soldadas com Trincas de Fadiga. In: IV Conferencia Panamericana de END: 2007 Buenos Aires – disponível em: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/29.pdf> acesso em 10/11/2012.

[19] ESCRIBANO, J. M. IMAGEN POR ULTRASONIDOS- TRANSDUCTORES – Disponível em: <http://www.cdvni.org/certificacion/guia3imagenporultrasonidos.pdf> (acesso em 09/09/2012).

[20] MANICA, R. **Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada.** Porto Alegre, 2002. 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

[21] Middleton, G.V., *et al.* **Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows.** In: Marine sediment transport and environmental management. John Wiley & Sons: New York, 1976.

[22] Dias, J. A. Correntes Turbidíticas. Disponível em: <http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks/Turbiditos.pdf> acesso em 19/09/13.

[23] Booth, G. Estructuras de fluidificación en conglomerados. Disponível em: <http://www.biodiversidadvirtual.org/geologia/Estructuras-de-fluidificacion-en-conglomerados.-img1371.html> acesso em 13/07/13.

[24] MIDDLETON, G. V. Experiments on density and turbidity currents III. **Deposition of Sediment. Canadian Journal of Earth Sciences** v.4, pp. 475-505, 1967.

[25] BRITTER, R. E.; Simpson, E. J. Experiments on the dynamics of a gravity current head. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v.88, p. 223-240, 1978.

[26] GOLDFINGER, C. *et al.* Deep-water turbidites as Holocene earthquake proxies: the Cascadia subduction zone and Northern San Andreas Fault systems. **Annals of Geophysics.** v.46, n.5, 2003.

- [27] KUENEN, P.H.H., et al, C.I. Turbidity currents as a cause of graded bedding. **Journal of Geology**, v.58, 91-127, 1950.
- [28] AVILA, M. D. **Modelagem física de correntes de densidade no estudo de depósitos turbidíticos**. Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- [29] LOWE, D.R. Suspended-load fallout rate as an independent variable in the analysis of current structures. **Sedimentology**.v.35p. 765–776, 1988.
- [30] AYRES, A., *et al*. Relationship between P and S wave velocities and geological properties of nearsurface sediments of the continental slope of the Barents Sea. **Geophysical prospecting**, 1999.47.n4, p. 431-441.
- [31] KIBBLEWHITEA.C. Attenuation of sound in marine sediments: a review with emphasis on new lowfrequency data. **Journal of the Acoustical Society of América**.v. 82, pp. 716–738, 1989.
- [32] AYRES, A., *et al*. Parâmetros físicos de sedimentos marinhos superficiais da região costeira de Caravelas, sul da Bahia. **Revista brasileira de geofísica**, v. 28, pp. 279-289, 2010.
- [33] HAMILTON, E.L. Compressional-wave attenuation in marine sediments. **Geophysics, Society of Exploration Geophysicists**, v. 37, pp. 620–646, 1972.
- [34] HAMILTON, E.L. Geoacoustic modeling of the sea floor. **Journal of the Acoustical Society of America**, 68: 1313-1336, 1980.
- [35] RICHARDSON MD. In situ, shallow-water sediment geoacoustic properties. In: ZHANG R & ZHOU J (Eds.). *Shallow-Water Acoustics*. China Ocean, Beijing, China, 1997, pp. 163-170.
- [36] BUCKINGHAM M. J. Wave propagation, stress relaxation, and grain-to-grain shearing in saturated, unconsolidated marine sediments. **Journal of the Acoustical Society of America**, 108: 2796-2815, 2000.

[37] BUCKINGHAM MJ. A three-parameter dispersion relationship for Biot's fast compressional wave in marine sediment. **Journal of the Acoustical Society of America**, 116: 769-776, 2004.

[38] GONÇALVES, R. V. **Nanocompósitos poliméricos para imageamento não invasivo em tanques de simulação hidráulica**. Porto Alegre. 2013. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Faculdade de Engenharia. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

[39] MISSÁGIA, R. M.; *et al.* A modelagem Física Sísmica na UENF/LENEP: descrição e teste dos sistema. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica: 2010, Brasília. pp. 01-06.