UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE – UFF
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
LABORATÓRIO DE GEOLOGIA MARINHA - LAGEMAR

HELBER CARVALHO MACEDO

ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS COMPRESSIONAIS (P) EM SEDIMENTOS MARINHOS

Niterói, RJ
Maio de 2006

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

HELBER CARVALHO MACEDO

ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS COMPRESSIONAIS (P) EM SEDIMENTOS MARINHOS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Geologia e Geofísica Marinha.

Orientador: Prof. Dr. ALBERTO GARCIA de FIGUEIREDO Jr.

Co-Orientador: Prof. Dr. JOÃO CARLOS MACHADO

Niterói, RJ
Maio de 2006

HELBER CARVALHO MACEDO

ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS COMPRESSIONAIS (P) EM SEDIMENTOS MARINHOS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Geologia e Geofísica Marinha.

Aprovada em 16/05/2006

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alberto Garcia de Figueiredo Jr. (Orientador)
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. João Carlos Machado (Co-Orientador)
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Dr. Arthur Ayres Neto
Consultor na área de Geofísica

Prof. Dr. Jorge Jesus Cunha Palma
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Cleverson Guizan Silva
Universidade Federal Fluminense - UFF

Niterói
Maio de 2006

M141 Macedo, Helber Carvalho
Análise da propagação de ondas compressionais (P) em sedimentos marinhos / Helber Carvalho Macedo. – Niterói : s.n., 2006.
98 f.
Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha) – Universidade Federal Fluminense, 2006.

1. Acústica subaquática. 2. Sedimentos marinhos. I. Título.

CDD 534.098153

O trabalho é o inteirar, o desenvolver, o apurar as energias
do corpo e do espírito, mediante a ação contínua
de cada um sobre si mesmo e sobre
o mundo que construímos.

Rui Barbosa

Este trabalho é especialmente dedicado
a minha esposa Erika
e ao nosso bebê.

AGRADECIMENTOS

À Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) e ao Laboratório de Geologia Marinha, LAGEMAR-UFF, por todo apoio e pela confiança depositada no nosso projeto.

À CC (T) Lucia Artusi, pela incansável, profissional e entusiasmada colaboração durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alberto Garcia de Figueiredo Jr., expresso os meus mais sinceros agradecimentos. Sua dedicação, apoio, conhecimento técnico e amizade estiveram presentes a todo tempo. A sua estimada família, sua esposa Neuza e sua filha Mônica Figueiredo, o meu muito obrigado pela participação e importante colaboração na aquisição dos transdutores.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. João Carlos Machado, do Programa de Engenharia Biomédica (PEB) da COPPE-UFRJ, agradeço sua compreensão, por aceitar um desafio distinto das atividades comuns do PEB, sua dedicação, sólido apoio técnico e amizade.

Aos demais integrantes da Banca Examinadora, Dr. Arthur Ayres Neto, Prof. Dr. Jorge J. C. Palma e Prof. Cleverson Guizan Silva, agradeço pelas oportunas críticas e sugestões, além de toda ajuda despendida durante a pesquisa, que agregaram muito valor a esta dissertação.

Aos ilustres professores do corpo docente do LAGEMAR-UFF, pelos ensinamentos e orientações, fundamentais ao meu aprendizado e à elaboração desta pesquisa.

Aos professores Wagner Coelho e Marco A. Krüger, e ao colega Maurício Cagy do PEB, pelo auxílio e pelos ensinamentos ministrados durante o curso de Propagação do Som.

A Dra. Eliane Gonzalez Rodriguez e aos colegas do IEAPM, CC Franswillian, CC (T) Canabarro e CC Xavier, externo os meus agradecimentos pelas seguras orientações e pelo constante estímulo.

Ao CMG Lages, CMG Frederico, CMG Lucchetti, CMG (T) Souza, CF Roscher, CF Remy, CC Seydel e a tripulação do NHo Taurus que, em cada fase do desenvolvimento desta “comissão”, contribuíram com compreensão, apoio e incentivo. Em especial, agradeço ao CC André Ferreira, pelo profissionalismo, senso de justiça e confiança.

Aos professores (CMG-RRm) Carlos Eduardo Parente e (CMG-RRm) Ocleci Machado da Costa, e aos CF Bêttega (IPqM), CC Jéferson (CASOP) e CT (T) Ana Greco (IPqM), pelas orientações e sugestões no planejamento e desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas do Departamento de Ensino da DHN, CC (T) Izabel Peres, CC Alexandre Gomes, CC (T) Heloísa Tavares, SG Jerri Machado, SG Marcio e CB Sílvia Letícia que, dentre suas muitas atividades, me distinguiram com apreço; e do Centro de Hidrografia da Marinha, CF Torres, CF Leandro, CC (T) Izabel King e CT (T) Alexandre Caúla, sou-lhes grato pela companhia e pelas sensatas orientações.

Aos colegas da Petrobras - CENPES, Luiz Alberto Santos, Guilherme Vasquez, Edimir M. Brandão, Aline A. Vargas, Marcos Dantas, Rodrigo A. dos Santos, pela cordialidade com que me receberam naquele Centro e pelas orientações. Em especial agradeço a Marcus Soares pelo companheirismo, incentivo e apoio.

À tripulação do AvPqOc Diadorim, SC (Mestre) Manoel Vianna, 1º SG CN Elias, 2º SG MR Ricardo, 2º SG TI-TO Messias, 2º SG AR Elias, CB EL Jonilson, pela dedicação, profissionalismo e pelo espírito marinheiro demonstrados durante a Comissão Oceanográfica na área de pesquisa. Também, nesta comissão, foi inestimável a cooperação do amigo Sílvio Ramos Souza, da empresa Rusky Duck, que com competência e esforço contribuiu para o sucesso da coleta dos testemunhos.

A Rogério Santos, Kleverson A. do Nascimento, Maitê Medeiros, Cláudia Zetune, Marcela Pellizzon, André Luiz Silva, Marcos Neunamm , Ricardo A. dos Santos, Sérgio C. de Vasconcelos, Fabiano T. da Silva, Anderson G. Almeida e demais amigos de turma e de sala de aula do LAGEMAR, que contribuíram, cada um a seu modo, para a realização desta dissertação, os meus sinceros agradecimentos pelo companheirismo e por todo apoio.

Às funcionárias do LAGEMAR, Jenny C. de Oliveira, Eneida Falcão e Patrícia Martins, ao colega do CPD Augusto Magalhães e ao funcionário Fernando N. Acosta, do Laboratório de Sedimentologia, agradeço pela dedicação, pelo apreço e pela importante colaboração prestada durante o curso.

Ao Sr. Célio C. Coelho pela dedicação e esmero com que construiu a ferramenta de perfilagem de ultra-som.

Finalmente, agradeço a minha esposa Erika M. Albuquerque, a meus pais, Helber Macedo e Nely C. Macedo, e aos meus irmãos Hélcio e Heline, por estarem sempre ao meu lado. Nas salas de aula da vida, vocês são os professores dos mais preciosos valores.

Ao bom Deus, agradeço pela saúde, benção e luz que me acompanharam nesta caminhada.

SUMÁRIO

EPÍGRAFE V
DEDICATÓRIA VI
AGRADECIMENTOS VII
SUMÁRIO IX
LISTA DAS FIGURAS XI
LISTA DAS TABELAS XIII
LISTA DE SIGLAS E UNIDADES DE MEDIDA XIV
RESUMO XVI
ABSTRACT XVIII
1 - INTRODUÇÃO 1
2 - OBJETIVOS 4
3 - ÁREA DA PESQUISA 5
3.1 - Localização, Características Geomorfológicas e Oceanográficas 5
3.2 – Geologia e Sedimentologia 9
4 - PROPAGAÇÃO ACÚSTICA EM SEDIMENTOS MARINHOS 14
4.1 – Propriedades Elásticas 15
4.1.1 – Módulo de Compressão ou Volumétrico (k) 16
4.1.2 – Módulo de Cisalhamento ou Rigidez (μ) 16
4.1.3 – Módulo de Elasticidade ou de Young (E) 17
4.1.4 – Razão de Poisson (v) 18
4.2 - Velocidades de Propagação de Ondas Acústicas 19
4.3 - Atenuação de Ondas Acústicas 21
5 - CARACTERIZAÇÃO DO SEDIMENTO MARINHO 24
6 - METODOLOGIA 26
6.1 – Sistema de Medição 28
6.1.1 – Método de Cálculo da Velocidade 32
6.1.2 – Método de Cálculo da Atenuação 36
6.2 - Calibração do Sistema 40
6.3 - Coleta dos Testemunhos, Descrição e Granulometria 42
7 - RESULTADOS 46

8 - DISCUSSÃO 74
8.1 - Seções onde não houve recepção do sinal 74
8.2 – Análise dos Perfis de “Vp” 76
8.3 - Análise dos Resultados de Atenuação 80
8.4 – Identificação das Interfaces entre Camadas de Sedimentos 82
8.5 - Relações entre as Velocidades e a Atenuação 83
9 - CONCLUSÕES 84
10 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 86
11 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 88
12 - GLOSSÁRIO 97
APÊNDICE – I – Descrição Sedimentológica dos Testemunhos
APÊNDICE – II – Fotografias dos testemunhos abertos
APÊNDICE – III – Análise Granulométrica

LISTA DAS FIGURAS

		Página
Fig. 1	Localização da área de pesquisa	5
Fig. 2	Principais seqüências estratigráficas	7
Fig. 3	Mapa sedimentológico	8
Fig. 4	Modo de propagação das ondas P	14
Fig. 5	Modo de propagação das ondas S	14
Fig. 6	Sistema de medição da velocidade e atenuação	28
Fig. 7	Ferramenta de perfilagem	29
Fig. 8	Testemunho imerso no tanque com água	29
Fig. 9	Testemunho posicionado no tanque de medição	30
Fig. 10	Planos representativos das linhas de medição no testemunho	30
Fig. 11A	Propagação da onda de US na amostra 01, linha 1, ponto 3	32
Fig. 11B	Propagação da onda de US na amostra 01, linha 1, ponto 17	32
Fig. 12	Sistema de medição com a demonstração das distâncias	33
Fig. 13	Perfil de velocidade para as linhas 1 e 2 do testemunho 5	35
Fig. 14	Gráfico de amplitude do espectro em função da frequência	39
Fig. 15	Diagrama de atenuação para linha 2 do testemunho 5	39
Fig. 16	Calibração – fase 1. Linhas longitudinais (1 e 2)	40
Fig. 17	Calibração – fase 1. Perfil sônico linhas 1 e 2	40
Fig. 18	Calibração – fase 2. Linhas circulares (M e N)	41
Fig. 19	Calibração – fase 2. Perfil sônico linhas M e N	41
Fig. 20	Calibração – fase 3. Perfis de velocidade	41
Fig. 21	Calibração – fase 3. Diagramas de atenuação	42
Fig. 22	Foto do testemunhador a pistão (Kullenberg)	43
Fig. 23A	Triângulo de classificação de sedimentos	44
Fig. 23B	Legenda de identificação dos sedimentos	45
Fig. 24	Testemunho 1 – Representação da litologia e perfil de Vp	48
Fig. 25	Testemunho 1 – Diagramas de atenuação	49
Fig. 26	Testemunho 3 – Representação da litologia e perfil de Vp	50

Fig. 27	Testemunho 3 – Diagramas de atenuação	51
Fig. 28	Testemunho 2 – Representação da litologia e perfil de Vp	53
Fig. 29	Testemunho 2 – Diagramas de atenuação	54
Fig. 30	Testemunho 4 – Representação da litologia e perfil de Vp	56
Fig. 31	Testemunho 4 – Diagramas de atenuação	57
Fig. 32	Testemunho 5 – Representação da litologia e perfil de Vp	60
Fig. 33	Testemunho 5 – Diagramas de atenuação	61
Fig. 34	Testemunho 7 – Representação da litologia e perfil de Vp	62
Fig. 35	Testemunho 7 – Diagramas de atenuação	63
Fig. 36	Testemunho 6 – Representação da litologia e perfil de Vp	65
Fig. 37	Testemunho 6 – Diagramas de atenuação	66
Fig. 38	Testemunho 8 – Representação da litologia e perfil de Vp	67
Fig. 39	Testemunho 8 – Diagramas de atenuação	68
Fig. 40	Testemunho 9 – Representação da litologia e perfil de Vp	70
Fig. 41	Testemunho 9 – Diagramas de atenuação	71
Fig. 42	Valores de velocidade para as medições nos sedimentos	72
Fig. 43	Valores para atenuação, em função da freqüência	73

LISTA DAS TABELAS

		Página
Tabela I	Velocidade da água e distância entre transdutores	35
Tabela II	Localização e características dos testemunhos	43
Tabela III	Classificação de Sedimentos Marinhos	45
Tabela IV	Faixa de valores de velocidade para cada tipo de sedimento	72
Tabela V	Faixa de valores de atenuação para a freqüência de 1,6 MHz	73
Tabela VI	Medidas de velocidade e atenuação de onda compressional	79

LISTA DE SIGLAS E UNIDADES DE MEDIDA

AvPqOc = Aviso de Pesquisa Oceanográfico

BNDO = Banco Nacional de Dados Oceanográficos

$CaCO_3$ = Carbonato de Cálcio

CASOP = Centro de Apoio a Sistemas Operativos da Marinha

CENTRATLAN = Operação Centro do Atlântico (DHN-LAGEMAR-NRL)

CHM = Centro de Hidrografia da Marinha

COPPE = Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

dB = Decibel

dB/m = decibel por metro

DHN = Diretoria de Hidrografia e Navegação

E = Módulo de Elasticidade ou módulo de Young

FB = Folha de Bordo

FFT = Algoritmo da Transformada de Fourrier

GEOMAR = Operação de Geologia Marinha (PGGM)

G-S = Modelo teórico de propagação de ondas P e S, denominado *Grain-Shearing*

GPIB = *General Purpose Interface Bus*

IEAPM = Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira

IPqM = Instituto de Pesquisas da Marinha

k = Módulo de Compressão, ou Volumétrico, ou *Bulk Modulus*

kHz = Quilohertz

LAGEMAR = Laboratório de Geologia Marinha

LUS = Laboratório de Ultra-Som

MHz = Megahertz

NDT = *Non-destructive Inspection*

μ = Módulo de Cisalhamento ou Rigidez

P = Classificação de onda compressional

PEB = Programa de Engenharia Biomédica da COPPE

PGGM = Programa de Geologia e Geofísica Marinha

PVC = Material plástico formado por policloreto de vinila

REMAC = Reconhecimento Global da Margem Continental Brasileira

S = Classificação de onda cisalhante

UFF = Universidade Federal Fluminense

UFRJ = Universidade Federal do Rio de Janeiro

US = Ultra-som

Vp = Velocidade de onda compressional

3D = Diagrama em três (3) dimensões, três eixos

λ = Constante de Lamé

λ = Comprimento de onda

ν = Razão de Poisson

ρ = Densidade

σ = Tensão normal

ε = Deformação relativa

ε_h = Contração lateral

ε_l = Distensão longitudinal do sólido

ϕ = Deformação angular

τ = Tensão de cisalhamento

RESUMO

A velocidade e a atenuação da onda compressional são propriedades que contribuem de modo significativo para o desenvolvimento de modelos geoacústicos do fundo marinho. Os resultados obtidos a partir de tais modelos podem ser amplamente aplicados em projetos relacionados à construção e operação de equipamentos *sonar*, à calibração da sísmica de reflexão utilizada em águas rasas, à caracterização geotécnica do leito marinho e à prospecção de minerais.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise das relações existentes entre as propriedades acústicas de sedimentos marinhos (velocidade e atenuação) e um dos seus principais parâmetros sedimentológicos: a granulometria. Um sistema de medição destas propriedades foi desenvolvido e montado em laboratório. A freqüência utilizada foi de 2,25 MHz. Os sedimentos foram coletados em testemunhos de sondagem na plataforma continental do estado do Rio de Janeiro, nas proximidades da Ilha do Cabo Frio, cidade de Arraial do Cabo. Foram coletados nove (9) testemunhos, totalizando 12,0 m de sedimentos. Foi realizada a descrição sedimentológica deste material e medições de granulometria. Sete (7) tipos de sedimentos foram identificados: areias grossas, médias e finas, areia lamosa, lama arenosa, lama compactada e fluida. Nos pacotes sedimentares amostrados, foi observada a existência de seqüências gradacionais nos testemunhos de n° 1, 3, 4, 6 e 8, que podem ser associadas a depósitos de tempestade.

Com os testemunhos em laboratório, foram executadas aproximadamente 2.550 medições acústicas. Os resultados obtidos permitiram construir perfis de velocidade da onda (Vp) e diagramas em 3D de atenuação, em função da freqüência.

Nas seções dos testemunhos onde foram encontrados seixos, cascalhos e areia grossa, não houve registro de sinal no transdutor receptor, fator que está associado ao espalhamento do sinal (*scattering*).

Nas areias médias, foram registrados os maiores valores de velocidade, que variaram de 1.555 a 1.752 m/s. A atenuação neste material variou de 1.110 a 1.300 dB/m.

Nas areias finas foram medidas velocidades na faixa de 1.635 a 1.715 m/s; com relação à atenuação, os valores observados foram os menores adquiridos nesta pesquisa (400 a 700 dB/m).

Na areia lamosa, os valores de velocidade variaram de 1.550 a 1.644 m/s e a atenuação variou de 1.250 a 1.750 dB/m, sendo estes valores de atenuação os maiores medidos neste trabalho.

Na lama arenosa, a velocidade medida variou de 1.492 a 1.639 m/s e a atenuação de 1.150 a 1.550 dB/m.

A lama compactada registrou valores de 1.493 a 1.600 m/s, se aproximando muito dos valores medidos nas lamas arenosas. Portanto, para a propriedade acústica da velocidade, as lamas arenosas têm um comportamento semelhante ao da lama compactada. Já os valores de atenuação variaram de 850 a 1.150 dB/m.

Na lama fluida, os valores de “Vp” variaram em uma estreita faixa, de 1.530 a 1.563 m/s, caracterizando um material mais homogêneo. A atenuação foi baixa, medindo valores de 500 a 600 dB/m.

Portanto, no que diz respeito à velocidade de propagação, pode-se afirmar que os valores medidos estão de acordo com os tabelados na literatura. Os perfis de velocidade identificaram interfaces entre camadas de sedimentos. Com relação aos resultados da atenuação, o diagrama construído permitiu uma boa avaliação do comportamento espectral do sinal, principalmente com relação à linearidade.

ABSTRACT

Compressional wave velocity and attenuation are important properties that contribute to the development of sea floor geoacoustic models. Results of such modeling can be widely applied in projects related to sonar construction and operation, shallow water seismic calibration, geotechnical sea floor characterization and prospecting.

In this context, the main purpose of this research is to investigate the relationship between acoustic properties of marine sediments (wave speed and attenuation) and sedimentological parameters, including grain-size.

In laboratory, an ultrasonic system of 2.25 MHz was constructed to measure compressional wave propagation in marine sediments. Nine (9) piston-cores were collected at Rio de Janeiro continental shelf, offshore Arraial do Cabo, totaling twelve (12) meters of sediment. Before splitting the cores, approximately 2.550 measurements were taken. After this, cores were split in two halves and described. Grain-size measurements were taken. Seven (7) types of sediments were found: coarse, medium and fine sands, muddy sand, sandy mud, consolidated and fluid mud. Cores 1, 3, 4, 6 e 8 showed size-graded sequences, related to storm deposits.

In core sections with pebbles, gravels and coarse sands, no signal was registered in the receptor transducer, because signal scattering.

The medium sands have higher values of sound speed, varying from 1,550 to 1,752 m/s. Attenuation varied from 1,110 to 1,300 dB/m.

The fine sands have values in a narrow band from 1,635 to 1,715 m/s. The attenuation has the smallest values acquired in this research, varying from 400 to 700 dB/m.

The propagation in muddy sands recorded values of sound speed in the range from 1,555 to 1,644 m/s. Attenuation varied from 1,250 to 1,750 dB/m, constituting the largest values in this research.

The sandy mud has values from 1,492 to 1,639 m/s. Attenuation varied from 1,150 to 1,550 dB/m, considered high when compared to other sediments.

The consolidated mud has values from 1,493 to 1,600 m/s, very similar to values in sandy mud. Therefore, in terms of velocity, sandy mud has the same behavior when compared with consolidated mud. Attenuation values varied from 850 to 1,150 dB/m.

The fluid mud has a narrow range of values from 1,530 to 1,563 m/s. Hence this medium is very homogeneous and has a low grade of anisotropy. The attenuation results were very low varying between 500 a 600 dB/m.

Results permitted to construct sound velocity profiles and 3D attenuation diagram. The sound velocity was presented in terms of range (maximum and minimum values) and results showed coherence with data sets taken from literature. Interfaces between sedimentary layers were also identified. The 3D attenuation diagram in frequency domain displayed good information of spectral attenuation.

1 - INTRODUÇÃO

As ondas compressionais, também conhecidas como longitudinais ou de pressão (P), são ondas mecânicas que têm como principal característica o seu modo de deslocamento em um meio, onde as partículas se movimentam e vibram na mesma direção de propagação da onda. Ondas sonoras são ondas mecânicas compressionais que podem ser consideradas como uma onda de deslocamento "*x*" no espaço, ou uma onda de pressão. A propagação da onda sonora é uma seqüência de compressão e rarefação (Kinsler *et al*., 1982).

No ambiente marinho, as ondas (P) podem se propagar nas massas d'água e nos sedimentos e rochas que compõem o fundo.

Para melhor compreender os efeitos que estes diferentes meios provocam na transmissão do som, diversos modelos acústicos têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados, visando obter informações detalhadas das relações entre as propriedades físicas e os parâmetros geoacústicos que regem este tipo de propagação. Estes modelos são valiosos recursos que permitem medir, inferir e prever os valores das propriedades físicas da propagação do som em um determinado ambiente marinho. Entretanto, a complexidade deste processo e a dificuldade de obtenção de medições *in situ*, fazem com que a quantidade de dados disponíveis na literatura, sobre estas relações, ainda seja reduzida (Gorgas *et al*., 2002; Buckingham, 2005).

Portanto, conhecer os conceitos relacionados à propagação das ondas (P) em camadas de sedimento marinho, bem como as relações entre as propriedades acústicas deste meio (velocidade e atenuação) e seus parâmetros sedimentológicos (granulometria, densidade, porosidade, teor de água, resistência ao cisalhamento, etc.) significa produzir ferramentas e metodologias que auxiliarão a formulação de soluções para o aperfeiçoamento de modelos acústicos.

Segundo Buckingham (1997), as propriedades acústicas dos sedimentos marinhos representam um real interesse para os especialistas em acústica subaquática, no que diz respeito à predição das perdas de propagação do som, e para os sismólogos, geofísicos e geólogos ligados à exploração *offshore* de óleo e gás.

De acordo com Ayres Neto (1998) e Ayres e Theilen (2001), as propriedades físicas dos sedimentos marinhos, tais como: velocidade de onda compressional e cisalhante, resistividade elétrica, radioatividade gama e susceptibilidade magnética têm sido sistematicamente adquiridas em várias partes do mundo. Os resultados destas investigações podem ser utilizadas na avaliação das condições de estabilidade do fundo marinho, em

mineração subaquática e na solução de problemas ligados à engenharia portuária, como por exemplo, operações de dragagem.

Para Hamilton (1980), Richardson *et al*. (1997 e 2002) e Buckingham (2000 e 2004), os parâmetros e as propriedades relacionadas a seguir são necessários à modelagem geoacústica de um ambiente marinho: (1) identificação do tipo de sedimento ou rocha que compõe o fundo e suas camadas subseqüentes; (2) espessura, formato das camadas e a localização das principais superfícies refletoras; (3) velocidade (Vp) e atenuação da onda compressional (P); (4) velocidade e atenuação de onda cisalhante (S); (5) densidade; e (6) propriedades elásticas do meio.

Gorgas *et al*. (2002) ressaltam a importância do uso de altas freqüências nas medições das propriedades geoacústicas das primeiras camadas de sedimentos, aumentando assim a riqueza de detalhes dos sistemas de mapeamento. Esta seria uma forma de superar as atuais limitações de equipamentos como: *side-scan sonar* e ecobatímetro multi-feixe. Segundo Boegeld *et al*. (1999), a qualidade dos sinais de retorno destes equipamentos depende da morfologia e das propriedades geoacústicas do fundo e do subfundo marinho.

Claramente, a compreensão da composição dos sedimentos marinhos e suas microestruturas são fundamentais para as futuras tentativas de modelagem do comportamento acústico do fundo do mar (Gorgas *et al*., 2002).

Davis *et al*. (2002) obtiveram bons resultados na produção de mapas com uma distribuição espacial das propriedades acústicas do fundo do mar. Neste experimento foi utilizada uma metodologia de inversão, aplicada a dados de reflexão sísmica de alta resolução, onde os sinais são calibrados com medidas realizadas "in situ" e em testemunhos de sondagem.

No Programa REVIZEE (Figueiredo Jr. e Madureira, 1999), mapas de classificação de sedimentos foram construídos a partir da análise de dados acústicos coletados por uma ecossonda EK-500 (Simrad), operando na freqüência de 38 kHz.

Neste amplo contexto, o Laboratório de Geologia Marinha (LAGEMAR - UFF) e o Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) uniram seus esforços e apoiaram o desenvolvimento deste projeto, que teve como principal propósito: - realizar medições de velocidade (Vp) e atenuação de onda compressional em sedimentos coletados por testemunhos de sondagem, e - relacionar os resultados obtidos com as características sedimentológicas do material coletado, comparando-os com aqueles disponíveis na literatura.

Para atender a este propósito, foi desenvolvida e montada uma aparelhagem capaz de registrar a propagação de ondas “P” em sedimentos (Macedo e Figueiredo Jr., 2005). Este sistema teve como base os experimentos realizados por Gorgas *et al*. (2002) e por Maa *et al*. (1997). Os primeiros executaram medições de “Vp” e atenuação em sedimentos coletados por testemunhos, na faixa de frequência do ultra-som (400 kHz). Maa *et al*. (1997) mediram variações de valores de velocidade de ondas “P”, em função do tempo de consolidação dos sedimentos, na faixa de freqüência de 2,25 MHz.

O sistema desenvolvido para a pesquisa em questão foi montado no laboratório de Ultra-som (LUS) do Programa de Engenharia Biomédica da COPPE – UFRJ. A cooperação deste laboratório foi obtida pela celebração de uma parceria entre o LUS, o IEAPM e a UFF.

Neste sistema de medições, as ondas mecânicas foram geradas a partir de pulsos elétricos convertidos em um transdutor. A freqüência utilizada para o transdutor foi de 2,25 MHz. Este sistema foi calibrado em água doce e em uma amostra de sedimentos controlada, composta por areia média, areia fina e argila.

Os testemunhos de sondagem utilizados nesta pesquisa foram coletados na plataforma continental do estado do Rio de Janeiro, no litoral localizado nas proximidades da Ilha do Cabo Frio, na cidade de Arraial do Cabo (Fig. 1). Foram coletados nove (9) testemunhos, com diâmetro de 50 mm, e comprimentos que variam de 60 cm a 219 cm. No total, foram coletados 12,0 m de sedimentos. Em seguida, estes testemunhos foram transportados para o LUS, onde foram realizadas aproximadamente 2.550 medições ao longo dos testemunhos.

Os resultados obtidos permitiram construir perfis de velocidade do som “Vp” e diagramas de atenuação, em função da freqüência. Estes dados, associados à análise sedimentológica do material que compõe os testemunhos, poderão ser aplicados em diversos projetos relacionados à propagação acústica em ambientes marinhos. Dentre estes, pode-se destacar a obtenção de parâmetros geoacústicos que integram as equações de cálculo do alcance sonar. A calibração dos métodos de processamento da sísmica de reflexão rasa, uma vez que os dados são adquiridos no domínio do tempo e, conhecendo-se os valores de velocidade nos sedimentos, estes podem ser convertidos para informações de profundidade. A caracterização geotécnica do fundo marinho, principalmente no que diz respeito à estabilidade, e a prospecção de minerais.

2 – OBJETIVOS

Os objetivos principais desta pesquisa consistem em:

1. Desenvolver e montar, em laboratório, um *sistema* que tenha a capacidade de emitir, receber, armazenar e processar dados de propagação de ondas compressionais (P) através de sedimentos marinhos de testemunhos de sondagem; e
2. Analisar os resultados obtidos nas medições, estabelecendo relações entre as propriedades acústicas dos sedimentos marinhos (velocidade e atenuação) e suas características sedimentológicas.

3 - ÁREA DA PESQUISA

3.1 – Localização, Características Geomorfológicas e Oceanográficas

A área de estudo, definida pelas coordenadas de latitude 22°57’S a 23°30’S e longitude 042°30’W a 041°57’W está inserida na plataforma continental do Rio de Janeiro, a oeste da ilha do Cabo Frio e ao largo da laguna de Araruama, entre 30 m e 145 m de profundidade (Fig.1). A área possui aproximadamente 36000 km^2, com 33 milhas náuticas de comprimento por 33 milhas de largura e situa-se entre as bacias de Santos e de Campos, em um setor conhecido como Alto do Cabo Frio.

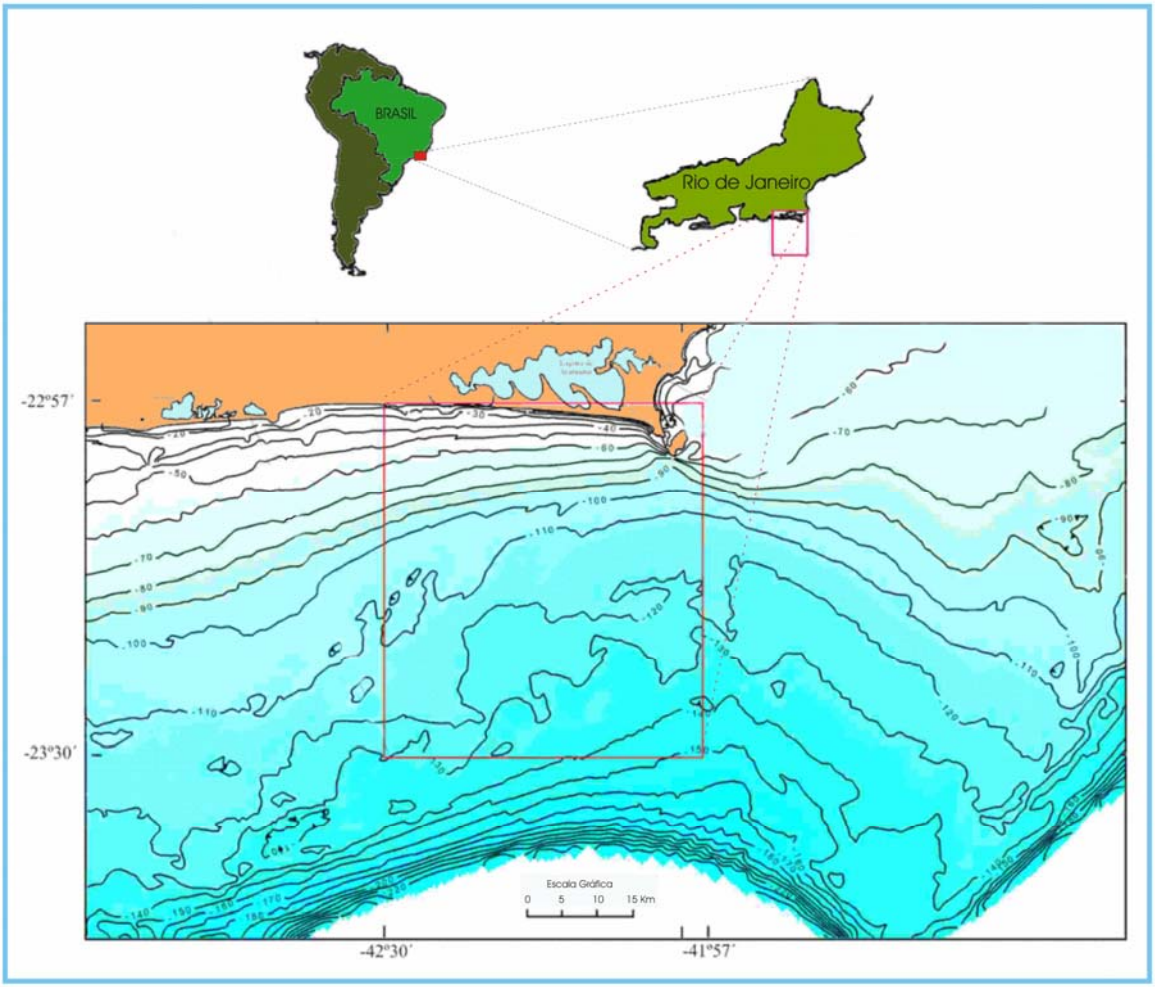


Figura 1 – Localização da área de pesquisa, mapa batimétrico (Artusi, 2004)

As características climáticas e geográficas específicas da área de pesquisa determinam uma maior complexidade na intensidade dos processos climáticos e oceanográficos que, por sua vez, influenciam os processos sedimentares e a produtividade do sistema marinho local, determinando uma distribuição característica dos sedimentos de fundo, como por exemplo, as lamas da plataforma média e os carbonatos da plataforma externa (Artusi, 2004).

O fenômeno da ressurgência é também um dos resultados desta complexa conjunção de fatores. Na região de Cabo Frio, a ressurgência se caracteriza pelo afastamento do litoral das águas quentes da Corrente do Brasil, em função da inflexão geográfica da costa na direção E-W, da predominância dos ventos de direção N - NE, e da força de Coriolis, resultante do sistema de rotação da terra. Esta situação favorece a emersão das águas frias e profundas, ricas em nutrientes, oriundas das altas latitudes.

Moreira e Mendonça (1976) indicam que as águas profundas ao se aproximarem da costa sobem à superfície, derivando em seguida para o oceano indo ao encontro da Corrente do Brasil.

Nesta região, também em decorrência da ressurgência, pode-se observar uma alta concentração de vida marinha devido à grande produtividade orgânica. Como conseqüência, grandes depósitos de sedimentos biogênicos são formados.

Para Artusi (2004), a ressurgência é um fenômeno de grande importância na deposição de sedimentos carbonáticos na região, devido à grande quantidade de carapaças formadas pelos organismos marinhos.

O regime de micro-marés da plataforma continental adjacente à laguna de Araruama e a existência das barreiras Pleistocênica e Holocênica, descritas por Martin *et al.* (1997), responsáveis pelo fechamento daquela laguna, permitiram classificar esta costa como uma costa dominada por ondas, baseada na definição de Davies & Hayes (1984).

A morfologia, o gradiente do fundo e a distribuição sedimentar foram amplamente estudados por Artusi (2004) e Artusi *et al*. (2005), a partir dos dados das Folhas de Bordo (FB) do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). A distribuição dos sedimentos está baseada em 509 informações de amostras de sedimentos superficiais existentes no Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO/CHM) e no banco de dados do Programa de Geologia e Geofísica Marinha (PGGM). Quinhentos e sessenta quilômetros de registros sísmicos das comissões CENTRATLAN I, GEOMAR XVI, GEOMAR XX e DIADORIM I - 2003 também foram analisados e interpretados por Artusi (2004) para gerar informações do subfundo.

Com a integração dos dados de morfologia, do gradiente do fundo e da distribuição dos sedimentos, Artusi (2004) observou que na porção mais rasa, até a isobatimétrica de 105 m, o gradiente é mais elevado (0,26º) do que na plataforma externa. A distribuição dos sedimentos é basicamente terrígena, com teor de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) inferior a 20%. O mapa batimétrico revela curvas isobatimétricas regulares e quase paralelas à linha de costa, até a profundidade de 105 m. Nesta área foi observada a diminuição do tamanho dos grãos de sedimentos, no sentido de oeste para leste, conforme também descrito por Muehe e Carvalho (1993). Abaixo de 105 m, o gradiente é mais suave (0,04º) e as isobatimétricas são irregulares. Nesta área os sedimentos superficiais são predominantemente de origem biogênica e possuem teor de $CaCO_3$ superior a 80%. Com base em registros sísmicos, Artusi (2004) identificou quatro seqüências sedimentares sobre o embasamento acústico, limitadas por quatro discordâncias, em um pacote de sedimentos de até 120 m de espessura (Fig. 2). No que diz respeito à propagação acústica, tais discordâncias representam superfícies refletoras.

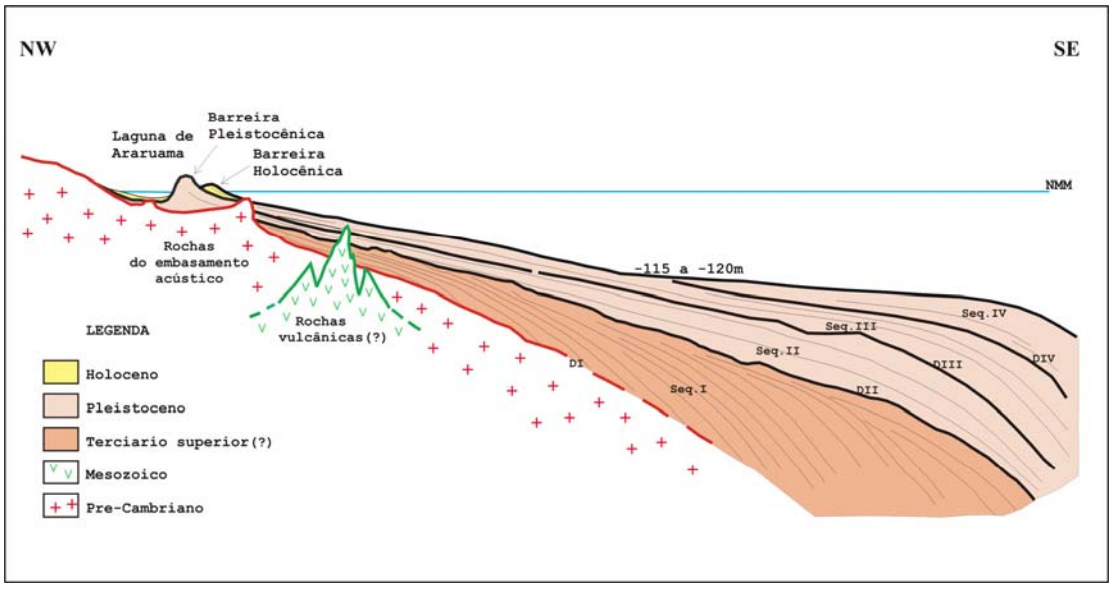


Figura 2 – Perfil esquemático, transversal à linha de costa, mostrando as principais seqüências estratigráficas identificadas na área de estudo (Artusi, 2004)

As informações dos sedimentos superficiais permitiram a Artusi (2004) a construção de um mapa sedimentológico da região. Este foi de fundamental importância para o planejamento e definição dos pontos de coleta dos testemunhos desta pesquisa (Fig. 3).

Próximo à costa foram coletados os testemunhos 1, 2 e 3, onde existe a predominância de areias de granulometria diversa. Os testemunhos 4, 5, 6, 7 e 9 foram coletados sobre a cobertura lamosa e o testemunho 8, em um ponto distante 28 milhas da costa, em uma localização onde a concentração de carbonato de cálcio nos sedimentos é superior a 80%.

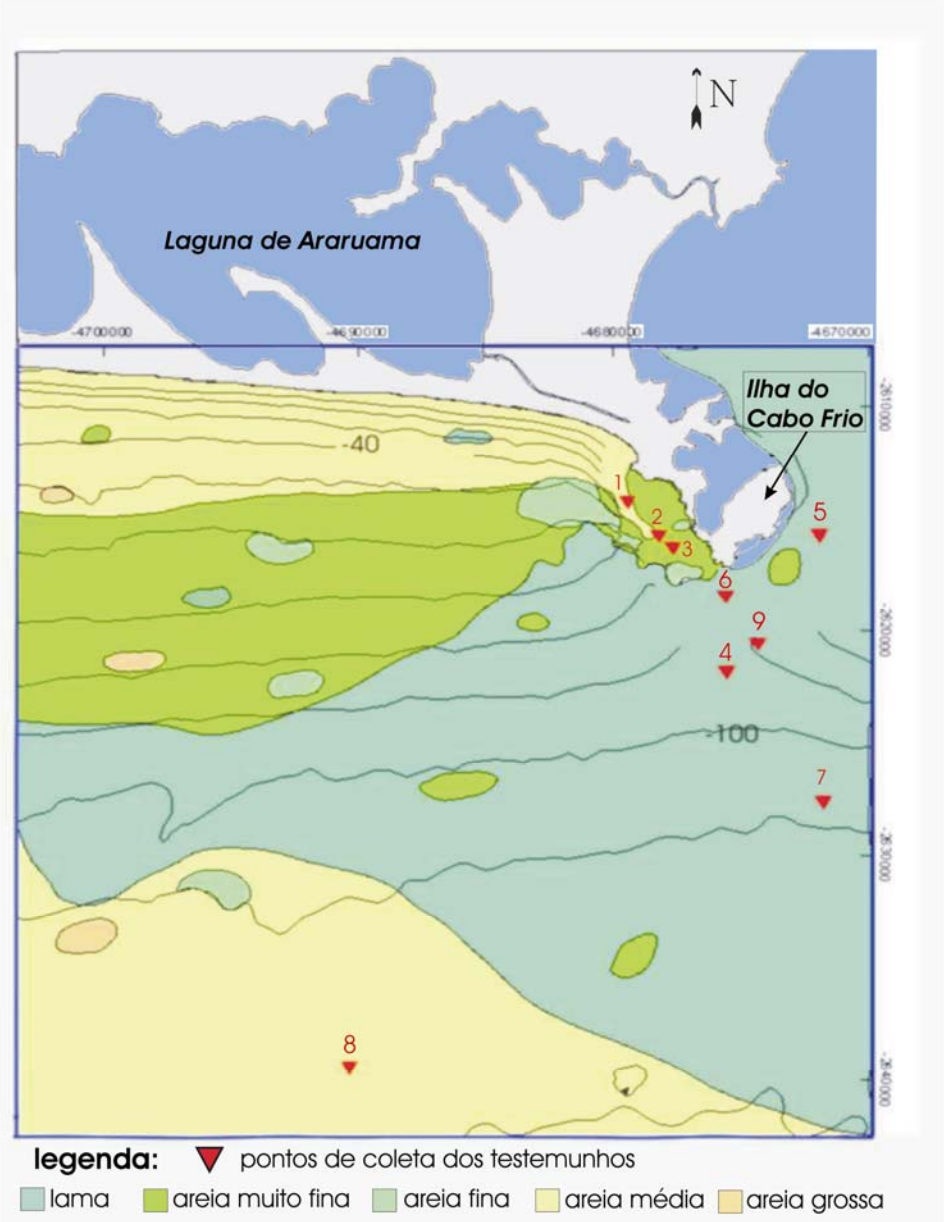


Figura 3 – Mapa sedimentológico com a localização dos testemunhos (Artusi, 2004)

3.2 – Geologia e Sedimentologia

A distribuição de sedimento na superfície do fundo marinho representa o último evento ali registrado, enquanto a distribuição de sedimento em testemunho representa uma sucessão de eventos ao longo do tempo. A análise dos nove (9) testemunhos, associada ao mapa da distribuição sedimentar de Artusi (2004), permitiu obter uma visão espacial e temporal dos processos de sedimentação ocorridos na área.

Neste item da dissertação será apresentada uma análise simplificada dos fatores responsáveis pela formação dos pacotes sedimentares encontrados. Cabe ressaltar, que este assunto merece um tratamento mais profundo e detalhado, tema que será sugerido para trabalhos futuros.

Segundo Reading (1996), uma seqüência de fácies é uma sucessão de fácies sedimentares que passam na vertical, gradualmente, de uma para outra. Em geral, as seqüências são limitadas no topo e na base por uma superfície erosiva ou por uma superfície representativa de um hiato na deposição de sedimentos. Em alguns pacotes sedimentares, as fácies de uma associação aparecem intercaladas, ocorrendo de modo organizado, com as transições verticais gradacionais formadas regularmente. Outra possibilidade é a ocorrência de intercalações desorganizadas com transições abruptas.

Diversos são os tipos de seqüências observadas nos ambientes deposicionais. Assim como não são poucos os fatores e processos responsáveis pela formação de tais pacotes sedimentares. As seqüências clássicas mais comuns são as denominadas gradacionais ou granodecrescentes, e as granocrescentes. Ambas podem ou não estar associadas a algum tipo de estratificação ou selecionamento de grãos.

Segundo Figueiredo Jr. *et al*. (1982), existem no mínimo quatro modelos que podem estar relacionados, individualmente ou de modo conjunto, à formação de acamamentos gradacionais: modelo estratificado, migração de formas de fundo, liquefação do fundo e depósitos de tempestade, sendo este último abordado de maneira mais detalhada neste trabalho.

Nos depósitos de tempestade, os sedimentos são suspensos e mobilizados por correntes de fundo geradas por ondas de alta energia. Com a redução deste efeito, os sedimentos são depositados de forma gradativa, aqueles maiores e mais pesados no fundo, sobrepostos pelos mais finos e leves. Neste tipo de depósito pode haver um contato abrupto na junção dos finos com os grossos.

Este tipo de depósito já foi descrito por Figueiredo Jr. *et al*. (1982) e Figueiredo Jr. (1980) na plataforma continental do Rio Grande do Sul e costa leste americana, sendo pela primeira vez descrito na área de estudo.

A seguir, serão relacionadas às características de cada testemunho coletado na área de pesquisa, associadas a hipóteses sobre o processo responsável pela sua formação.

O testemunho 1 (apêndices A-I-1 e A-II-1) foi coletado a uma profundidade de 41,2 m e sua posição dista cerca de 1,5 km da linha de costa. Este é composto basicamente por areias médias quartzosas, distribuídas de forma homogênea. Foram observados fragmentos biodetríticos entre a base e a posição 14 cm, indicando um pacote granodecrescente. O sedimento coletado é coincidente com o descrito no mapa sedimentológico da área (Fig. 3), elaborado por Artusi (2004).

O testemunho 2 (apêndices A-I-2 e A-II-1) foi coletado a uma profundidade de 49,4 m e sua posição dista 1,3 km da linha de costa. Este é composto por areias finas quartzosas, com grãos bem selecionados e distribuídos de forma homogênea. Exceção foi observada entre as posições 23 e 26 cm, onde existe uma fina camada de areia lamosa. O sedimento observado no topo deste testemunho é coincidente com o mapa sedimentológico da área (Fig. 3).

Esta descrição é bastante curiosa e pode ser justificada, basicamente, por um possível avanço dos depósitos de sedimentos lamosos oriundos da direção N – NE. A posição de coleta deste testemunho é bem próxima ao canal que separa o continente da ilha do Cabo Frio (canal do Boqueirão), situação geográfica que pode ter facilitado o fluxo de lamas oriundos do Norte. Outra hipótese que pode fundamentar este tipo de formação é a existência de um paleo-depósito lagunar. Ponzi *et al*. (1990) citam a existência de depósitos lagunares, observados em testemunhos de sondagem coletados nesta faixa batimétrica, os quais foram relacionados com prováveis sistemas de restingas e lagoas, como os encontrados na retaguarda das barreiras arenosas, formados a cerca de 13.000 anos atrás.

O testemunho 3 (apêndices A-I-3 e A-II-2) foi coletado a uma profundidade de 52,1 m e sua posição dista 1,1 km da linha de costa. Sua composição é de areias quartzosas de granulometria média e fina. A mistura ocorre em uma porcentagem aproximada de 65% para areia do tipo média e 35% para a fina. Foram observados fragmentos biodetríticos entre a base e a posição 9 cm, indicando um pacote granodecrescente. O sedimento observado não é totalmente coincidente com o mapa sedimentológico da área (Fig. 3), indicando que a área coberta por areias médias se estende mais para a direção SE.

Os testemunhos 1 e 3 são bastante semelhantes (apêndices A-I-1 e 3). É valido observar que ambos possuem fragmentos grosseiros de conchas, distribuídos de forma granodecrescente que, de acordo com Figueiredo Jr. *et al*. (1982), são indicativos de depósitos de tempestade. As tempestades de inverno, principalmente relacionadas a frentes frias provenientes da direção S – SW, são freqüentes nesta região (Artusi, 2004).

Para Artusi (2004), a distribuição dos sedimentos nas plataformas interna e média, de acordo com o diâmetro médio, aponta para uma distribuição relativamente paralela às linhas batimétricas. Há um predomínio de areia grossa a média na plataforma interna, enquanto que na plataforma média foi verificada uma variação do diâmetro dos grãos no sentido de oeste para leste, que passa de areia fina para muito fina até lama.

Os testemunhos 4 e 6 estão alinhados na direção N – S. Estes foram coletados, respectivamente, a uma profundidade de 93,5 m, distando 2,8 km da linha de costa, e a uma profundidade de 87,5 m, a uma distância de 0,9 km. Ambos têm uma composição bastante variada, mostrando um acamamento gradacional (apêndices A-I-4, A-I-6, A-II-2 e A-II-3), sendo um indício do avanço dos sedimentos lamosos oriundos da direção N – NE sobre areias relíquias dos cordões arenosos de paleo-praias. Outra hipótese que pode justificar esta composição é a sua semelhança com uma formação característica de depósitos de tempestade. São observados fragmentos biodetríticos entre a base e a posição 35 cm (testemunho 4, A-II-2) e entre a base e o ponto 22 cm (testemunho 6, A-II-3).

A principal diferença existente entre estes testemunhos, é a fina camada de lama que o testemunho 4 possui em seu topo. Isto pode ser explicado pelo fato deste estar em uma posição mais profunda em relação ao testemunho 6, havendo assim uma condição de mar mais calmo, que permite a deposição de siltes e argilas.

Os sedimentos observados no topo destes testemunhos são coincidentes com o descrito no mapa sedimentológico (Fig. 3).

Martin *et al*. (1977) descrevem vários acamamentos gradacionais, associados a depósitos de tempestade, em testemunhos coletados na plataforma continental interna do sul do Brasil. Estes apresentam gradação uniforme entre os sedimentos grossos e finos, sem contato abrupto. Figueiredo Jr. e Kowsmann (1976) e Figueiredo Jr. (1980) mencionam a existência de depressões entre os cordões arenosos submersos, também localizados na plataforma continental do sul do Brasil. Estes tipos de formações são freqüentemente cobertas por depósitos de material grosseiro, tipo conchas inteiras e fragmentos, e resíduos de arenito de praia. Tais depósitos são periodicamente remobililizados, quando da passagem de uma

frente fria que gera ondas de tempestade. Estas fornecem energia suficiente ao sistema, para criar correntes de fundo de velocidade de 35 cm/s ou mais nas referidas depressões. Para Martin *et al*. (1972), esta forma de concentração de grosseiros também pode estar associada a uma paleo-linha de costa, cuja deposição ocorreu durante um período de nível de mar mais baixo.

Ao longo da costa do Rio Grande do Sul, vários testemunhos foram coletados nestas depressões, situadas entre cristas de areia, e muitos mostram depósitos gradacionais. Estes são geralmente compostos por fragmentos de arenito de praia, associados a grandes e pesadas conchas na base, gradando para areias finas, pequenas conchas e fragmentos menores de conchas no topo (Figueiredo *et al*., 1982).

Kumar e Sanders (1976) também denominaram de depósitos de tempestade os acamamentos gradacionais observados em testemunhos coletados na plataforma continental da América do Norte, nas proximidades da costa de Long Island, em profundidades de zero a 21 m. Estes acamamentos indicavam um encontro de sedimentos finos e grossos. Os grossos encontravam-se na base, com clásticos de dimensão de até 4 cm. Na parte superior foram encontrados sedimentos finos. O contato entre estes sedimentos era abrupto. Na mesma região, em profundidades de 21 a 36 m, estes mesmos autores observaram acamamentos gradacionais que foram denominados de “depósitos de tempestade relíquia”.

Os testemunhos 5 e 7 são bastante semelhantes (apêndices A-I-5, A-I-7, A-II-2 e A-II-3). O primeiro foi coletado a uma profundidade de 63,3 m e a uma distância de 1 km da Ilha do Cabo Frio. O segundo foi coletado a 110,5 m, distando 10 km daquela ilha. Ambos são compostos por lama, coincidindo com o descrito no mapa sedimentológico (Fig. 3). A concentração de fragmentos biodetríticos é baixa para ambos, estando na faixa de 5%. O testemunho 7 apresenta uma estreita camada de lama arenosa nas proximidades do ponto 60 cm. A existência desta camada pode ser comprovada pelos resultados da granulometria (apêndice A-III-14), que mostra que no ponto 60 cm a concentração de areia ultrapassa 25%.

De todos os testemunhos, o 8 foi aquele coletado na maior profundidade (119,5 m) e a maior distância da costa (28,5 km). Este testemunho é composto por areias lamosas bioclásticas, sendo a areia de granulometria fina (apêndices A-I-8 e A-II-4). Foi observada uma grande concentração de fragmentos de conchas, indicando uma alta concentração de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), o que está de acordo com o mencionado por Artusi (2004). Com relação ao tipo de fundo indicado no mapa sedimentológico da área (Artusi, 2004) para essa posição, areia média, este não é coincidente com o sedimento observado no topo do testemunho (areia lamosa).

O testemunho 9 foi coletado a uma profundidade de 90,5 m e sua posição dista 2,2 km da linha de costa. Este é composto por lama, do topo até o ponto 50 cm, seguido por lama arenosa deste ponto até o final (apêndices A-I-9 e A-II-4). Também, a partir de 50 cm, são observados fragmentos biodetríticos que aumentam de tamanho e concentração em direção à base. Com relação a estes fragmentos, pode-se afirmar que eles formam uma gradação granodecrescente, da base até a posição 50 cm. O sedimento coletado é coincidente com o descrito no mapa sedimentológico da área (Fig. 3).

Os pacotes sedimentares encontrados no conjunto de todos os testemunhos, exceto o 3, confirmam os trabalhos de Dias *et al*. (1982), Alves e Ponzi (1984), Carvalho (1990) e Muehe e Carvalho (1993), que descreveram um afinamento do tamanho do grão de oeste para leste, o que permite inferir que a direção preferencial do transporte dos sedimentos ocorre neste sentido. Os sedimentos coletados no topo dos testemunhos 4, 5, 6, 7 e 9 confirmam a existência do corpo lamoso nas proximidades da ilha do Cabo Frio, que pode ter uma espessura de até 14 m. A formação deste corpo é resultado das condições hidrodinâmicas daquele local, fortemente influenciadas pelo sistema deposicional do delta do rio Paraíba do Sul, associado ao aporte sedimentar dos rios Macaé e São João (Dias *et al.,* 1982).

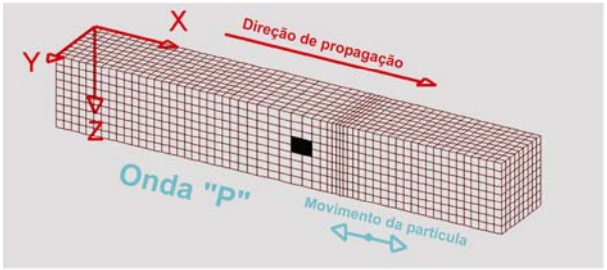
4 – PROPAGAÇÃO ACÚSTICA EM SEDIMENTOS MARINHOS

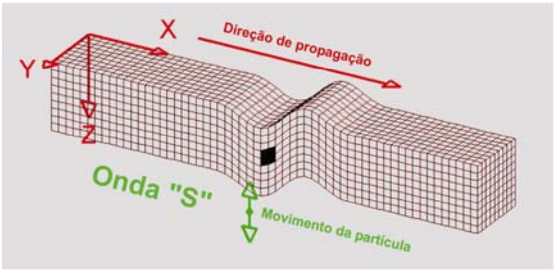
Este capítulo tem como propósito principal a apresentação da base da teoria que explica o fenômeno da propagação acústica em sedimentos marinhos, sua relação com as constantes elásticas e a identificação dos processos que controlam as propriedades acústicas analisadas neste estudo: velocidade e atenuação de onda compressional.

Para Kinsler *et al*. (1982), a acústica pode ser definida como um processo de geração, transmissão e recepção de energia na forma de ondas de vibração em um meio. Associada a este processo, existe uma força interna de restauração (elástica) responsável pela manutenção da configuração de átomos e moléculas que compõem a estrutura do meio, quando este é submetido a algum tipo de tensão. Esta força elástica, juntamente com a inércia do sistema, faz surgir uma oscilação vibratória que permite a geração e a transmissão de ondas acústicas, sendo esta propagação do som um fenômeno acústico bastante conhecido e estudado.

Urick (1975) menciona que a propagação da onda sonora é o deslocamento de energia mecânica na forma de energia cinética das partículas em movimento, e energia potencial oriunda da tensão aplicada a um meio elástico. A intensidade da onda é um parâmetro que pode ser definido como sendo a quantidade de energia por segundo que flui através de uma unidade de área, orientada perpendicularmente à direção de propagação da onda.

Basicamente, existem dois tipos de propagação de ondas acústicas: a compressional (P) e a cisalhante ou secundária (S).





Figuras 4 e 5 - Modo de propagação das ondas P e S (Braile, 2004)

No primeiro, ocorre a compressão e rarefação das partículas que compõem o meio em movimentos paralelos à direção de propagação da onda. No segundo modo de propagação não ocorre mudança no volume do meio, apenas a sua forma é alterada. Nas ondas S, as partículas são deslocadas em movimentos ao longo de linhas perpendiculares à direção de propagação da onda. As ondas S se propagam de modo mais lento, quando comparadas às ondas P e este

tipo de onda não se propaga em meios líquidos e gasosos (Parasnis, 1973; Kinsler *et al*., 1982; Ayres Neto, 1998).

Nesta dissertação, apenas a onda compressional será abordada.

A propagação acústica em sedimentos marinhos depende diretamente das propriedades elásticas do meio e revela propriedades físicas como velocidade e atenuação.

4.1 – Propriedades Elásticas

Para Dobrin e Savit (1988), a propagação de ondas acústicas ou sísmicas é definida como uma propagação de onda elástica, porque provoca deformações não permanentes nos materiais ou meios onde se propagam.

A teoria da elasticidade, aplicada ao estudo da acústica, fornece as relações entre a tensão e a deformação provocada pela passagem da onda em meios elásticos ideais, ou seja: homogêneos e isotrópicos. Estas relações dependem das propriedades elásticas do meio, sendo abordadas pela lei de Hooke (Fetter e Walecka, 1980; Dobrin e Savit, 1988).

Segundo a Lei de Hooke, a deformação de um meio é proporcional à tensão a ele aplicada e, interrompida a ação desta força, o meio retorna a sua forma original. Este processo ocorre em materiais que apresentam comportamento elástico, onde a proporcionalidade da relação entre deformação e tensão é linear (Fetter e Walecka, 1980).

As características e as propriedades físicas da propagação das ondas acústicas, principalmente no que diz respeito à velocidade, dependem das constantes elásticas abaixo relacionadas (Dobrin e Savit, 1988; Duarte, 2003):

- Módulo de compressão ou volumétrico, ou *bulk modulus* (k);
- Módulo de cisalhamento ou rigidez (μ);
- Módulo de elasticidade ou de Young (E); e
- Razão de Poisson (v).

As constantes de Lamé (λ e μ) também definem o comportamento elástico de um meio, sendo freqüentemente utilizadas. Estas são relacionadas com as demais constantes pela equação:

$$\lambda = k - \frac{2\mu}{3} \tag{1}$$

onde "k" representa o módulo de compressão e "μ" o módulo de rigidez.

Os próximos itens definem as principais constantes elásticas aplicadas a meios homogêneos e isotrópicos e suas respectivas equações, tendo como referência Fetter e Walecka (1980), Duarte (2003) e Guimarães (2004).

4.1.1 – Módulo de Compressão, ou Volumétrico, ou *Bulk Modulus* (*k*)

Também conhecido como módulo de incompressibilidade do meio, é definido como a razão entre a tensão aplicada a um bloco tridimensional, de material elástico, em seus três eixos, e a variação do volume deste sólido sujeito à compressão.
Este é definido pela equação:

$$k = \frac{\Delta P}{\Delta V / V} \tag{2}$$

onde:
ΔP = variação de pressão;
ΔV = variação de volume;
V = volume.

O módulo de compressão também pode ser definido em função das constantes de Lamé:

$$k = \lambda + \frac{2\mu}{3} \tag{3}$$

Se "*k*" tiver um valor muito alto, então o material pode ser considerado como muito duro, ou seja, ele não é muito compressível, mesmo sob grandes pressões. O valor de "*k*" sendo muito pequeno, significa que pouca pressão já é suficiente para comprimir o material (Dobrin e Savit, 1988).

4.1.2 – Módulo de Cisalhamento ou Rigidez (μ)

O módulo de cisalhamento é definido como a razão entre a tensão de cisalhamento (τ) e a deformação angular (ϕ) correspondente, ou seja, este módulo é a resistência oferecida pelo material à deformação angular provocada pela tensão cisalhante. Este pode ser descrito pela equação:

$$\mu = \frac{\tau}{\phi} \tag{4}$$

Se o material possuir um valor alto de "μ", será necessário uma tensão muito grande para que o material seja deformado.

Os gases e os líquidos não apresentam resistência ao cisalhamento, apresentando valores $\mu = 0$. Valores de "μ" pequenos, próximos a zero, remetem a materiais pouco consolidados.

A velocidade da onda cisalhante (S) é controlada pelo módulo de rigidez (μ). Nos sedimentos marinhos o "μ" é definido pela rigidez dos contatos dos grãos e pelo *frame moduli*, propriedade estrutural dos sedimentos (Ayres Neto,1998). Na água, o valor de "μ" para a propagação de ondas cisalhantes é igual a zero, logo não há propagação. No entanto, Hamilton (1976) concluiu que quase todos os sedimentos marinhos, apesar de seu conteúdo de água, possuem rigidez suficiente para transmitir ondas cisalhantes. Assim, nos sedimentos marinhos, a propagação de onda "S" ocorre através dos contatos intergranulares.

4.1.3 – Módulo de Elasticidade ou de Young (*E*)

É o coeficiente de proporcionalidade entre o esforço aplicado ao material e sua deformação na direção de aplicação do esforço. Este módulo mede a variação do comprimento do material devido à aplicação de uma tensão. Esta relação linear, entre a tensão e a deformação, é conhecida pela Lei de Hooke e, para casos unidimensionais, é definida segundo as equações (5) e (6):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{5}$$

onde:

E = módulo de Young;

σ = tensão normal; e

ε = deformação relativa.

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \tag{6}$$

em que "λ" e "μ" são as constantes de Lamé.

O processo, no qual a tensão e a deformação são proporcionais, é chamado de deformação elástica. O módulo de elasticidade "E" pode ser considerado como sendo uma resistência do material à deformação elástica causada por uma tensão uniaxial aplicada. Quanto maior for este módulo, mais rígido será o material ou menor será a deformação elástica que resultará da aplicação de uma dada tensão uniaxial.

4.1.4 – Razão de Poisson (ν)

Quando uma tensão de tração é imposta sobre um material, um alongamento elástico ocorre na direção da tensão aplicada. Como resultado desta distensão, existirão deformações nas direções laterais, perpendiculares à tensão aplicada. A razão entre a contração lateral ε_h e a distensão longitudinal do sólido ε_l é chamada de razão de Poisson, e é expressa segundo a equação:

$$\upsilon = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_l} \tag{7}$$

A razão de Poisson também pode ser determinada a partir da razão "*Vp/Vs*" e dos módulos elásticos "*k*" e "μ" segundo as equações:

$$\upsilon = \frac{1}{2}\left[\frac{\left(\frac{Vp}{Vs}\right)^2 - 2}{\left(\frac{Vp}{Vs}\right)^2 - 1}\right] \quad ; \text{ e} \tag{8}$$

$$\upsilon = \frac{3k - 2\mu}{2(3k + \mu)} \tag{9}$$

A razão de Poisson é sempre positiva e varia entre zero e 0,5. Logo, a compressibilidade diminui com o aumento da razão de Poisson. Esta informação é importante nos estudos ligados à engenharia geotécnica (Ayres Neto, 1998). Em materiais muito rígidos o "ν" é próximo a zero e nos fluidos é sempre igual a 0,5. Nos sedimentos marinhos o valor de "ν" é menor do que 0,5.

As constantes de Lamé também podem ser expressas em função do módulo de Young e da razão de Poisson, como:

$$\lambda = \frac{E\upsilon}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)} \quad ; \text{ e} \tag{10}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \tag{11}$$

De um modo geral, uma das maneiras de se obter os valores das constantes elásticas, é por meio de ensaios mecânicos de laboratório, onde os materiais são submetidos a esforços controlados e suas deformações são medidas e calculadas. Sob outro ponto de vista, se as propriedades físicas do meio forem conhecidas, como por exemplo as "*Vp*" e "*Vs*", pelo processo inverso será possível calcular o valor da Razão de Poisson, como demonstrado pela

equação (8) e, se ainda for possível medir a densidade do material (ρ), as demais constantes também poderão ser calculadas, como descrito pelas equações do próximo item (12) e (13).

Portanto, apesar de não fazer parte do escopo desta dissertação, uma vez que só foi possível obter medidas de "*Vp*" e atenuação, pode-se constatar que as constantes elásticas aplicadas a meios como os sedimentos marinhos, podem ser calculadas a partir de valores medidos de propriedades físicas. Esta possibilidade é uma importante contribuição ao processo de obtenção de parâmetros geoacústicos associados a este meio de propagação e, conseqüentemente, à construção de modelos acústicos.

4.2 – Velocidades de Propagação de Ondas Acústicas

As velocidades de propagação das ondas acústicas são dependentes das propriedades elásticas e da densidade dos materiais e podem ser determinadas pelas equações:

$$Vp = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{4/3\mu + k}{\rho}} \quad ; \text{e} \tag{12}$$

$$Vs = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{13}$$

em que as velocidades "*Vp*" e "*Vs*" referem-se às ondas compressionais e cisalhantes, respectivamente (Fetter e Walecka,1980; Ayres Neto, 1998). Considerando as relações para "*Vp*" e "*Vs*", pode-se estimar a relação entre estas velocidades através de:

$$\frac{Vs^2}{Vp^2} = \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} = \frac{1/2 - \upsilon}{1 - \upsilon} \tag{14}$$

Uma análise da equação (14) indica que as ondas (P) viajam mais rapidamente, e que a velocidade "*Vs*" varia de zero até cerca de 70% do valor da velocidade "*Vp*", uma vez que "ν" varia de zero a 0,5, fazendo com que a relação "*Vp/Vs*" varie de zero até o máximo de $1/\sqrt{2}$ (Guimarães, 2004).

A razão entre a velocidade de onda compressional e a cisalhante, tradicionalmente tem sido utilizada como um indicador litológico (Domenico, 1984). Esta é expressa pela equação (14), em termos do módulo de Young, módulo de rigidez e da razão de Poisson.

Para melhor compreender como ocorre a propagação de ondas acústicas em sedimentos marinhos, e para avaliar o tipo de informação que pode ser obtida em termos geológicos, geofísicos e ambientais, é imprescindível conhecer os princípios que controlam esta propagação (Ayres Neto, 1998).

As características dos sedimentos depositados em ambientes marinhos, que permitem este tipo de propagação, dependem basicamente de duas das propriedades elásticas acima descritas: o *bulk modulus* (k) e o módulo de cisalhamento (μ). De acordo com Woods (1991), os fatores de controle desses parâmetros em sedimentos marinhos são: porosidade, pressão de confinamento, *stress history* (mudanças de grande magnitude nas tensões de confinamento entre camadas de sedimentos/rochas, provocadas por explosões ou terremotos), a idade geológica, a tensão de cisalhamento, o grau de saturação, a temperatura e a taxa de consolidação.

Em geral, como os sedimentos podem estar misturados à água, grãos minerais, ar e gás, cada um destes materiais apresentará propriedades elásticas distintas. Logo, a propagação neste tipo de meio será influenciada pelo conjunto de todas as propriedades dos diferentes tipos de material (Ayres Neto, 1998).

No entanto, muitos autores têm demonstrado que a propagação de ondas compressionais em materiais porosos é basicamente controlada pela compressibilidade do fluido intersticial (Brown e Korringa, 1975; Hamilton e Bachman, 1982; Murphy *et al*., 1986; Freund, 1992; Tao *et al*., 1986; La Ravelec e Géguen, 1996; Ayres Neto, 1998).

Portanto, pode-se afirmar que os fatores geológicos que controlam a velocidade de onda (P) em sedimentos marinhos são porosidade, densidade e a pressão de confinamento. Em geral, existe uma tendência de aumento da "*Vp*", com a diminuição da porosidade e um aumento da densidade (Ayres Neto, 1998).

Para Freund (1992), a diferença entre a velocidade de onda (P) em um sedimento contendo água e a velocidade em um sedimento com gás, é definida principalmente pela diferença que existe entre os módulos de compressão (k). Os gases são mais compressíveis que os líquidos, os valores da "*Vp*" em sedimentos saturados por gás são menores que os valores de "*Vp*" em sedimentos saturados com líquidos.

4.3 – Atenuação de Ondas Acústicas

A propagação, e conseqüentemente a atenuação, de ondas em sedimentos marinhos é influenciada por uma série de fatores. No entanto, aqueles considerados mais significativos são: o movimento relativo entre a estrutura mineral e o fluido intersticial, e a fricção entre os grãos que compõem o material (Kibblewhite, 1989; Winkler e Nur, 1982; Best *et al*., 1994; Best e McCann, 1995; Ayres Neto e Theilen, 2001).

Kibblewhite (1989) menciona que quando uma energia sonora se propaga através de sedimentos saturados, parte desta energia é perdida por uma série de mecanismos. Alguns destes, como a fricção entre os grãos de minerais e o movimento relativo entre a estrutura mineral e os fluidos intersticiais, têm maior influência neste processo, que é usualmente denominado como atenuação "intrínseca". Em sedimentos marinhos, outros fatores tomam parte na atenuação. Bolhas de gás, fragmentos de conchas, cascalhos e outras heterogeneidades podem produzir perdas através de espalhamento (*scattering*). O somatório de todas essas perdas, que realmente devem ser consideradas em uma situação prática, dá ao fenômeno da atenuação uma outra denominação: atenuação "efetiva".

Para Hamilton (1972), o processo dissipativo dominante na atenuação, em sedimentos saturados de água, é a fricção interna entre partículas, isto é: a energia é perdida devido ao atrito entre as estruturas cristalinas no movimento intergranular. Logo, os parâmetros que têm maior influência no comportamento da atenuação em areias são a granulometria e a porosidade. Isto ocorre devido ao número e ao tipo de contato interpartículas. Angularidade, área dos pontos de contato, permeabilidade, o *bulk modulus* e o formato dos espaços porosos são alguns dos muitos fatores que estão relacionados a estes parâmetros e, conseqüentemente, ao processo de atenuação (Biot, 1956a,b; Hamilton, 1972; Stoll, 1985).

Em sedimentos coesivos ricos em siltes e argilas, Hamilton (1972) cita que a força de coesão existente nos contatos interpartículas é o fator predominante na absorção da onda sonora. A coesão é considerada como uma propriedade inerente de grãos finos e tem maiores efeitos nos siltes e nas argilas. É uma força que une, por processos físico-químicos de natureza intermolecular e intergranular, pequenas partículas adjacentes de um meio, provocando uma resistência à tensão de cisalhamento. As pequenas partículas, aparentemente, não estão em contato direto, elas são envolvidas por camadas de água que interagem entre si. Nos pontos onde partículas adjacentes apresentam maior aproximação, substâncias como óxidos de ferro, sílica e cálcio provocam processos de união (cimentação), aumentando a rigidez do meio.

De acordo com Buckingham (2005), nas medidas de atenuação, devem ser consideradas as perdas de energia relativa ao calor, oriunda do atrito entre as partículas, e aquelas perdas relacionadas ao espalhamento (*scattering*) que ocorrem em meios com grande heterogeneidade granular. Sendo este último fator associado à existência de fragmentos de conchas.

Segundo Kinsler *et al*. (1982) e Fish (1990), os mecanismos relacionados à atenuação são:

- absorção, que é a conversão da energia mecânica em térmica (calor), devido ao atrito entre as partículas;

- espalhamento (*scattering*), que ocorre quando a dimensão das partículas que compõem o meio é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda (λ) do pulso acústico, o que provoca múltiplas reflexões e desvios no feixe sonoro; e

- divergência do feixe. O feixe sônico não se apresenta uniforme quando se propaga num meio. Ele é divergente e sua intensidade varia conforme a distância da fonte emissora. Quanto mais distante do transdutor, menor será a sua intensidade. Quanto mais afastado estiver do eixo de maior pressão sônica, também menor será a intensidade. Esta redução na intensidade pode também ser representada pela diminuição na amplitude do sinal de recepção.

Os resultados obtidos por Winkler e Nur (1982) sugerem que a atenuação em ondas "P" aumenta com a saturação de fluidos, mesmo que em baixo grau. Entre 60 e 90% de saturação de água, a atenuação atingiu valores máximos. Estas observações podem ser explicadas pelos mecanismos de fluxo dos fluidos no interior e entre os poros.

No que diz respeito à relação de linearidade entre a atenuação e a frequência, Hamilton (1976, 1980), com base em diversos experimentos, considerou esta existente para uma ampla faixa de valores, variando de poucos Hz até MHz. Este ponto de vista é ratificado por Kibblewhite (1989), que cita que os experimentos desenvolvidos por Hamilton apresentam resultados extremamente eficazes, apesar de serem empíricos. Para Simpson *et al*. (2000 e 2003) esta variação linear também é existente, com base em medidas de laboratório em areias finas e médias.

No entanto, outros autores contestam esta posição (Biot, 1956a,b; McCann e McCann, 1969; Stoll, 1970, 1980, 1985). Para estes, o mecanismo de absorção em sedimentos marinhos é atribuído ao amortecimento viscoso causado pelo movimento relativo dos poros de fluidos em relação à estrutura mineral dos grãos. Logo, existe uma interação entre a estrutura do sedimento e os seus poros preenchidos por fluidos que, quando estimulados por uma onda acústica, resulta em uma dependência não linear entre a atenuação e a frequência.

Portanto, a dúvida: se a atenuação em sedimentos marinhos varia linearmente em função da freqüência, é uma questão de controvérsia ao longo de muitos anos (Buckingham, 2005). Considerando o experimento mais recente de Buckingham (2005) que aplicou sua teoria G-S (Grain-*Shearing*) a uma grande quantidade de dados disponíveis na literatura, pode-se afirmar que a variação da atenuação em função da freqüência é aproximadamente linear, ou seja, com um certo grau de tolerância, pode ser considerada linear para um amplo espectro de freqüência.

No desenvolvimento desta dissertação, o fenômeno estudado é classificado como atenuação "efetiva", uma vez que os resultados foram obtidos por um método prático de medição. No entendimento deste estudo, a relação de linearidade entre atenuação e frequência é ratificada, em concordância com os autores citados acima.

5 - CARACTERIZAÇÃO DO SEDIMENTO MARINHO

Este capítulo abordará o ponto de vista de diversos autores, no que diz respeito à caracterização do sedimento marinho enquanto meio de propagação de ondas “P”, ou seja, se este é classificado como elástico, viscoelástico ou anelástico. Conseqüentemente, como resultado desta análise, será verificado se o sedimento marinho é suscetível, ou não, à aplicação da Lei de Hooke e das constantes elásticas.

Estudos pretéritos caracterizam os sedimentos marinhos como meios compostos por materiais porosos saturados por água, com propriedades viscoelásticas. Neste tipo de meio, mediante a aplicação de uma força, os processos de compressão e rarefação não ocorrem de modo instantâneo, havendo um amortecimento e um retardo no movimento. Este fenômeno é devido à heterogeneidade do material e ao movimento relativo entre os poros de água e os grãos de minerais (Hamilton, 1972).

Gorgas *et al*. (2002) verificaram uma evidente variação da velocidade em função da freqüência, quando compararam em seu experimento medidas de laboratório, realizadas em areias, na faixa do ultra-som (400 kHz), com medidas *in situ* (7,5 kHz). Para Gorgas *et al*. (2002), esses resultados sugerem que sedimentos marinhos de granulometrias próximas à da areia, podem ser considerados como meios poroelásticos, onde os valores da velocidade aumentariam com o aumento da frequência. Tal comportamento de onda compressional através de meios porosos é denominado por Hamilton (1972) como “dispersão”, e está de acordo com as teorias de Biot (1956, a,b) e Kjartansson (1979).

Barbagelata *et al*. (1991) e Fu (1998) também publicaram resultados de “Vp” com este tipo de dispersão, em experimentos efetuados em areias.

No entanto, outros pesquisadores questionam a existência de uma variação da velocidade em função da freqüência. Hamilton (1972), Kibblewhite (1989), Bowles (1997) e Buckingham (2005) usam como principal argumento, o fato destas variações serem bastante pequenas para um amplo espectro de freqüência, sendo, portanto, desprezíveis.

Segundo Hamilton (1972), em siltes e argilas de alta porosidade, tanto para medidas de laboratório quanto para *in situ*, a “Vp” é usualmente menor no sedimento do que na água e praticamente não existem variações nos valores da velocidade (Vp) para uma ampla faixa de freqüência, incluindo MHz.

Recentemente, Buckingham (2005) elaborou um modelo teórico denominado “G-S” (*Grain-Shearing*), aplicado à propagação de ondas compressionais e cisalhantes em

sedimentos marinhos, considerados por ele como meios granulares inconsolidados. Nesta teoria, a forma específica de propagação e dissipação, recai no contato intergranular e se dá em função de 3 parâmetros geoacústicos: porosidade, granulometria e pressão de confinamento, esta última relacionada à profundidade do sedimento. Os resultados encontrados foram considerados satisfatórios, quando comparados a dados de medições *in situ* disponíveis na literatura e indicam variações muito pequenas na velocidade em função da freqüência.

Para sedimentos finos coesivos, como siltes e argilas, Gorgas *et al*. (2002) obtiveram resultados de "Vp" sem variação, para medidas em laboratório e *in situ*, na faixa de freqüência de 100 kHz, sugerindo a inexistência do comportamento de dispersão para propagação neste tipo de meio.

No que diz respeito à atenuação, Gorgas *et al*. (2002) encontraram grandes diferenças em seus resultados para as medidas em laboratório e *in situ*. Como era de se esperar, os valores medidos *in situ*, frequência de 7,5 kHz, foram bem inferiores àqueles medidos em laboratório (400 kHz), uma vez que a atenuação varia com a freqüência. Em parte, esses resultados também podem ser justificados pela maior porosidade das amostras medidas em laboratório, uma vez que este parâmetro está diretamente relacionado com a atenuação.

Para Maa *et al*. (1997) camadas de sedimentos inconsolidados comportam-se como materiais viscoelásticos, com pequena elasticidade e alta viscosidade.

Portanto, após esta ampla análise, nesta dissertação o sedimento marinho foi considerado como meio de propagação viscoelástico linear, ou aproximadamente elástico, em concordância com a maioria dos autores citados e, principalmente, seguindo os conceitos de Hamilton (1972) e Buckingham (2005). Como conseqüência, as relações entre força e deformação do meio foram consideradas lineares e suscetíveis à aplicação da Lei de Hooke e das constantes elásticas, considerando desprezível a variação (dispersão) nos valores da velocidade em função da freqüência da onda acústica, ratificando o método de cálculo da "Vp" apresentado no próximo capítulo.

6 – METODOLOGIA

A pesquisa desta dissertação foi desenvolvida em seis etapas. Na primeira, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os métodos de medição de velocidade e atenuação de onda compressional em sedimentos marinhos. As informações obtidas nesta fase serviram de base para o planejamento das tarefas subseqüentes: importação dos transdutores, desenvolvimento do sistema de medição adequado e definição dos programas de aquisição e processamento dos sinais a serem utilizados.

Na segunda etapa, o sistema proposto foi montado, testado e calibrado. Os resultados preliminares das medições em sedimentos foram satisfatórios, e as calibrações subseqüentes permitiram o aperfeiçoamento do programa de processamento de sinais (Macedo *et al*., 2005a). Para desenvolver e montar este sistema, este projeto contou com o apoio do Laboratório de Ultra-Som (LUS) do Programa de Engenharia Biomédica da COPPE – UFRJ. Este laboratório possui os equipamentos básicos necessários para a montagem do sistema em questão: uma placa geradora de pulsos, um osciloscópio digital e um programa de aquisição de sinais digitalizados, desenvolvido em ambiente LabView. Para complementar a aparelhagem, foi necessário importar dos E.U.A. um par de transdutores e suas respectivas conexões. Para processar os sinais das medições, foi desenvolvido pelo LUS um programa em ambiente MatLab.

A expedição oceanográfica de coleta dos testemunhos na área de pesquisa constituiu a terceira etapa deste trabalho. Foram coletados nove (9) testemunhos, somando 12,0 metros de sedimentos.

Na quarta etapa, foram realizadas aproximadamente 2.550 medições ao longo dos nove testemunhos coletados (Macedo *et al*., 2005). Foram construídos perfis de velocidade do som, a cada centímetro, em relação à posição no testemunho, e diagramas em 3D da atenuação, estes em função da frequência e da posição.

A quinta etapa compreendeu a abertura, fotografia, análise e descrição sedimentológica dos testemunhos. No Laboratório de Sedimentologia do LAGEMAR-UFF, foram realizadas 97 medições de granulometria em amostras de sedimentos, selecionadas ao longo dos testemunhos.

Na sexta e última etapa, os resultados das medições com ultra-som (US) foram analisados e interpretados, sendo comparados às características dos sedimentos coletados.

O modelo teórico de propagação do ultra-som (US) em sedimentos marinhos, utilizado nesta pesquisa, é baseado nos princípios da acústica geométrica, que pressupõem a propagação da onda como um raio de modo direto. Propagando-se de um ponto para outro, o raio escolhe o caminho para o qual o tempo de propagação tenha um valor mínimo (Greco, 2001). Este valor serve como parâmetro de referência para a comparação da velocidade de propagação e da atenuação de ondas compressionais em meios distintos, uma vez que a distância entre os pontos de geração e recepção do sinal é previamente estabelecida.

Gorgas *et al*. (2002) utilizou um modelo de cálculo semelhante para medições, em laboratório, de sedimentos inconsolidados de águas rasas, coletados por meio de testemunhos a gravidade no delta do rio Eel, Califórnia. Neste experimento, a freqüência utilizada foi de 400 kHz, foi realizada uma calibração em um tubo com água, os transdutores foram posicionados diametralmente opostos, na parte externa do testemunho, e o intervalo entre medidas foi de 1 cm. Estas medições foram repetidas em outro sistema, *Sensor Multi Track* de 500 kHz (Boyce, 1976), e os resultados produzidos tiveram valores muito próximos.

Utilizando os mesmos conceitos, Maa *et al*. (1997) realizaram 2 (dois) testes em sedimentos marinhos. Nesses experimentos foram construídos perfis de alta resolução de velocidade e amplitude de onda de ultra-som. Neste teste foi possível identificar pequenas interfaces nos sedimentos, acompanhando o tempo de consolidação.

Medidas de "Vp" em sedimentos coletados por testemunhos também foram realizadas no Cruzeiro 34/4 do navio Meteor, na região da plataforma continental do litoral norte do Brasil. As medições foram executadas em um sistema automático de perfilagem, com transdutores diametralmente opostos, posicionados de modo perpendicular ao eixo do testemunho. Nessas medições, o tempo de propagação da onda de ultra-som (US) na amostra foi também utilizado como parâmetro para o cálculo das propriedades acústicas dos sedimentos (Frederichs *et al*., 1997).

6.1 - Sistema de Medição

O sistema proposto (Fig. 6) tem como base o experimento de Maa *et al*. (1997) e de Gorgas *et al*. (2002), com pequenas modificações na geração do sinal (Macedo *et al*., 2005). Este é composto por:

- uma placa geradora e controladora de pulsos de ultra-som (Matec, modelo SR-9000, Hopkinton, MA, USA), condicionada a um *slot* de expansão de um computador comum;

- uma interface de comunicação de dados GPIB - *General Purpose Interface Bus* (Measurement Computing Corporation, modelo IEE - 488.2, Middleboro, MA, USA);

- um osciloscópio digital (Tektronix, modelo TK – 2220, Beaverton, OR, USA), instrumento que permite o controle e o ajuste do mecanismo de aquisição do sinal; e

- um par de transdutores de ultra-som, de contato (Panametrics- NDT, modelo V-133 RM, Waltham, MA, USA), freqüência de 2,25 MHz e diâmetro nominal de 6 mm. Estes foram submetidos a testes padrão, seguindo as normas TP 103 (Panametrics, 2005). Os transdutores são responsáveis pela conversão da energia elétrica em energia mecânica, na forma de onda acústica e vice-versa. Este fenômeno é realizado pelo efeito piezoelétrico inerente a pastilhas, ou cerâmicas, inseridas em seu corpo. Tais pastilhas, quando estimuladas, vibram na freqüência determinada no processo de fabricação.

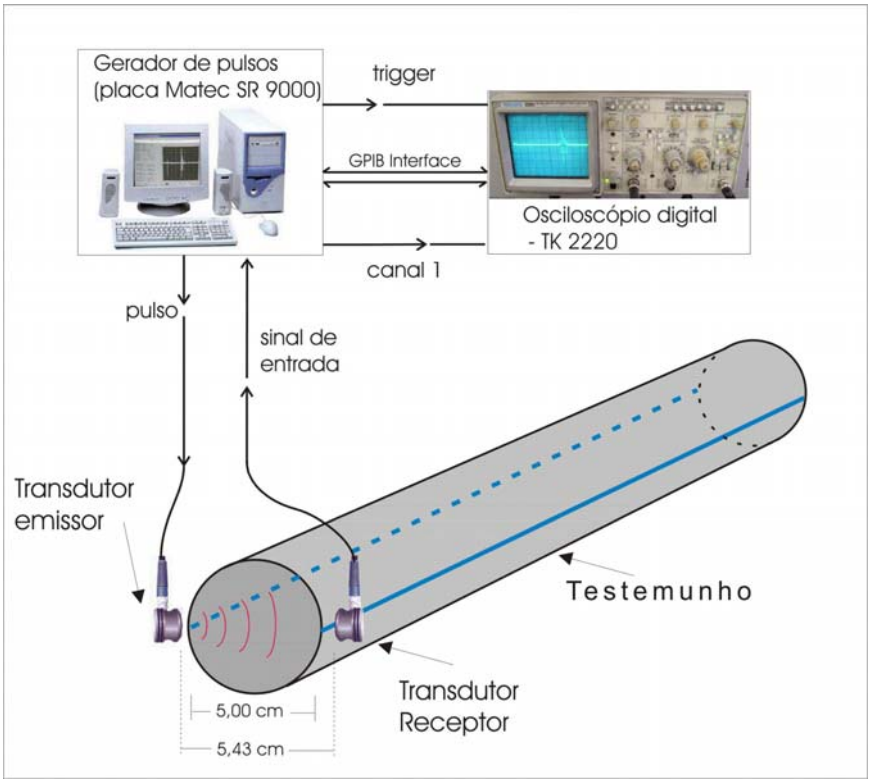


Figura 6 - Sistema experimental de medição da velocidade de propagação e atenuação de onda acústica (Macedo *et al*., 2005)

Os transdutores foram alojados nas extremidades da ferramenta de perfilagem (Fig. 7), que tem formato de pinça.

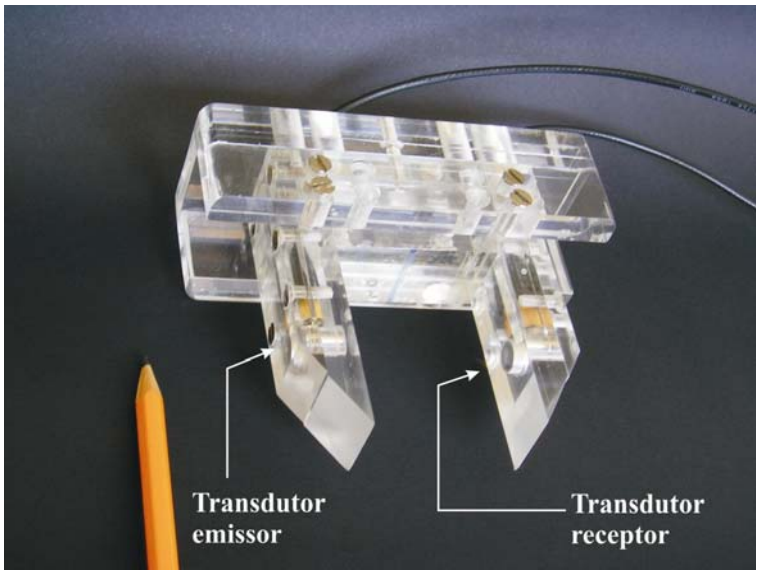


Figura 7 - Ferramenta de perfilagem. Local de alojamento dos transdutores

Durante o processo de medição, os testemunhos coletados foram imersos em água (Figs. 8 e 9) . Inicialmente, tentou-se unir os transdutores diretamente ao tubo de PVC do invólucro do testemunho. No entanto, a curvatura do tubo e o tamanho reduzido da face do transdutor, impediram que este acoplamento fosse adequado, uma vez que não foi possível alinhar os transdutores "TR" e "RC". Com os testemunhos imersos em água, a propagação em todo o trajeto da onda estava garantida e o alinhamento dos transdutores foi mantido com a rigidez da ferramenta de perfilagem. Deste modo, a onda de ultra-som propagou inicialmente na água, no PVC e, em seguida, no sedimento coletado.

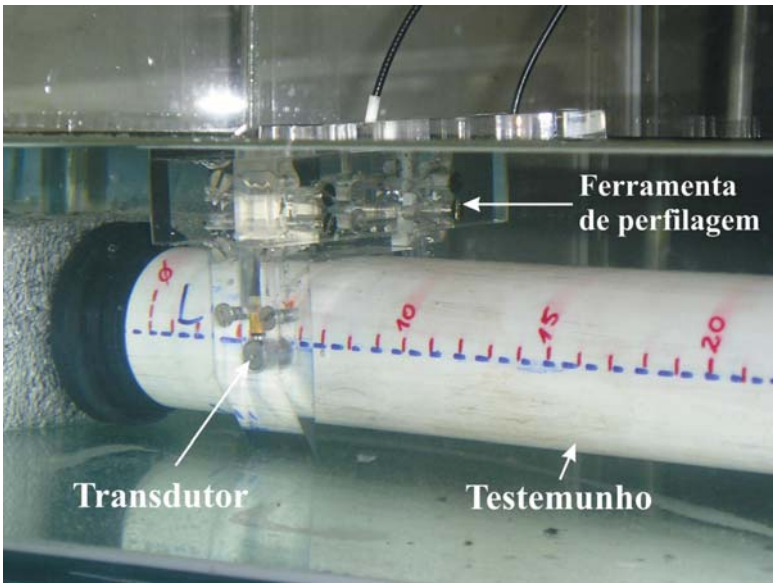


Figura 8 – Vista lateral do testemunho imerso no tanque com água

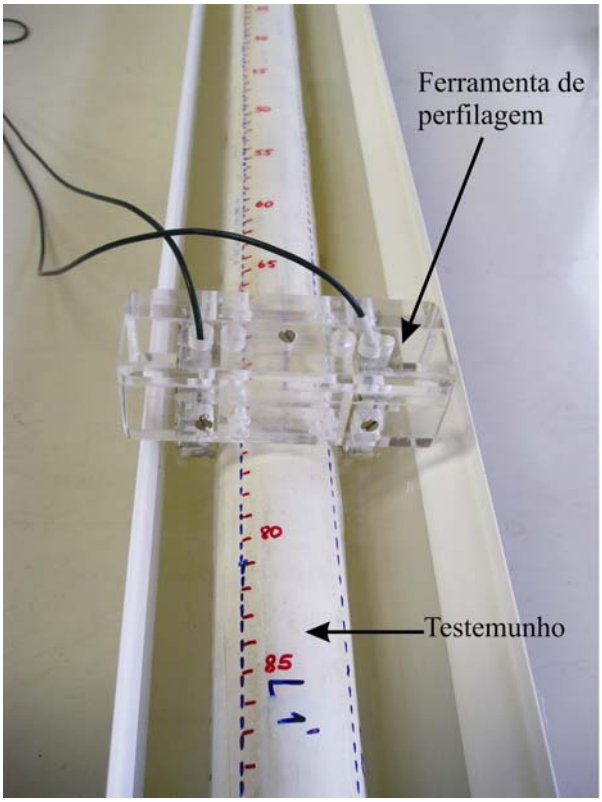


Figura 9 – Vista de topo do testemunho posicionado no tanque de medição

As medições foram feitas em duas etapas e em planos ortogonais, de modo que cada posição ao longo do testemunho tivesse dois valores. Este método teve como propósito verificar alguma diferença nos valores medidos, tendo em vista as possíveis alterações provocadas pela heterogeneidade do material. Cada etapa estava relacionada a uma linha de medição, referente a um plano. Logo, para cada testemunho foram construídos dois perfis de velocidade. O perfil denominado por "1", referente ao plano azul, e o perfil "2" para o plano vermelho. Estes planos estão defasados de 90˚ (Fig. 10).

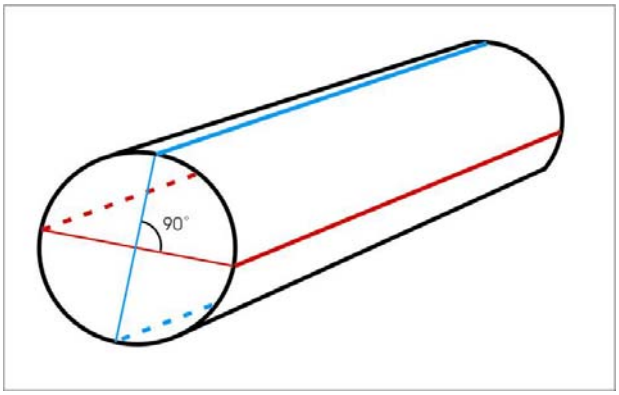


Figura 10 – Planos ortogonais representativos das linhas de medição no testemunho

Na aquisição e no processamento dos dados foram usados programas específicos desenvolvidos em ambiente LabView e MatLab, respectivamente, o que permite a medição do tempo de percurso do pulso acústico e a atenuação, além da análise espectral do comportamento do sinal. O programa de processamento recebeu a denominação de "*ultra_sed.mat*".

Os dados obtidos pelo sistema são: o tempo decorrido durante a propagação do pulso no percurso entre o transdutor emissor (TR) e o transdutor receptor (RC), e a diferença, em volts, entre as amplitudes espectrais dos sinais propagados na água e no sedimento, quando estas relações são comparadas.

A informação do tempo é utilizada no cálculo da velocidade, expressa em (m/s). Este tempo de propagação é computado entre dois instantes. O primeiro, é o momento inicial de excitação do transdutor "TR". O segundo, é o de chegada do sinal no transdutor "RC", identificado pelo ponto de intersecção entre o valor da amplitude no espectro, correspondente a um percentual de 90% do seu valor máximo, e a escala de tempo.

Inicialmente é realizada uma calibração do sistema para o cálculo da "Vp" na água. Neste momento é obtido o tempo de propagação do sinal na água. Posteriormente, mede-se o tempo de propagação do sinal no sedimento. O método da correlação cruzada permite o cálculo da diferença, denominada Δt, entre estes intervalos de tempo (água e sedimento). Conhecendo-se o Δt e a distância entre os transdutores, é possível calcular o valor da "Vp" para propagação no sedimento.

Com o dado de variação da amplitude, foi possível calcular a atenuação em decibel por metro (dB/m).

Cabe considerar, que alguns sinais apresentaram um espectro com muito ruído (Figs. 11A e 11B), fato natural para um fenômeno de propagação em meios viscoelásticos com heterogeneidade e anisotropia acentuada. Para evitar o registro de sinais espúrios, foi necessário investigar, um a um, todos os espectros dos sinais, e eliminar aqueles que não possuíam um ponto de amplitude máxima bem definido.

O eixo vertical dos gráficos das figuras 11A e 11B indicam a voltagem (volts) e o eixo horizontal o tempo de propagação em μs (microssegundo).

A figura 11A mostra a medida de uma onda "P" que se propagou no ponto 3 do testemunho 1 (areia média), onde o sinal é bem registrado em torno de 45 μs.

A figura 11B mostra uma medida realizada no ponto 17, também no testemunho 1. Neste ponto, não foi possível observar o sinal de chegada, isto pode ter ocorrido pelo excesso de ruído, ou pelo fato da onda ter sido totalmente atenuada em seu percurso.

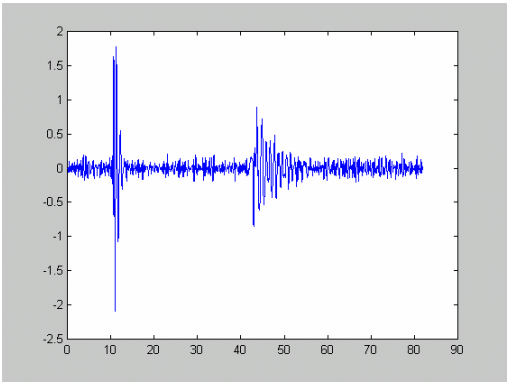


Figura 11A – Sinal com pouco ruído. Propagação da onda de US no testemunho 1, linha 1, ponto 3.

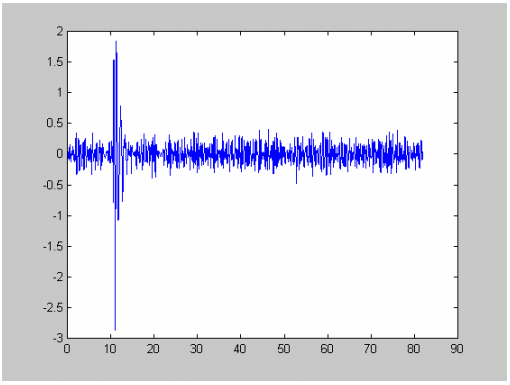


Figura 11B – Sinal com muito ruído. Propagação da onda de US no testemunho 1, linha 1, ponto 17.

Para o cálculo final da velocidade e atenuação, foi necessário considerar o tempo de propagação da onda de "US" na espessura da camada de acoplamento dos transdutores. Este valor foi calculado durante as calibrações do sistema, realizadas na água em uma temperatura de 24° C.

Para garantir a qualidade do sinal a ser interpretado, as medições foram submetidas a um filtro "passa-banda" estabelecido para valores entre 0,5 e 4 MHz, limitando assim os valores do espectro em torno da freqüência fundamental do transdutor receptor (2,25 MHz).

6.1.1 - Método de Cálculo da Velocidade

Para o cálculo da velocidade de propagação no sedimento marinho (*Csed*), foi utilizada a equação (Kinsler *et al*., 1982):

$$C = D/T \qquad (15)$$

sendo, respectivamente, o "*C*" , "*D*" e "*T* ", a velocidade, a distância e o tempo de propagação da onda entre os transdutores do sistema (pontos de transmissão e recepção do sinal).

Considerando que a onda sonora se propaga em três meios distintos: água, PVC (invólucro do testemunho) e o sedimento marinho; será assumida a seguinte nomenclatura para os termos das equações (Fig. 12):

- para a propagação na água no primeiro trecho: “*Cágua* ” , “*D 1* ” e “*T 1* ” ;
- para a propagação na água no segundo trecho: “*Cágua* ” , “*D 2* ” e “*T 2* ” ;
- para a propagação no PVC: “*Cpvc* ” , “*E* ” e “*Tpvc* ”; e
- para a propagação no sedimento marinho: “*Csed* ” , “ *L* ” e “*Tsed* ” .

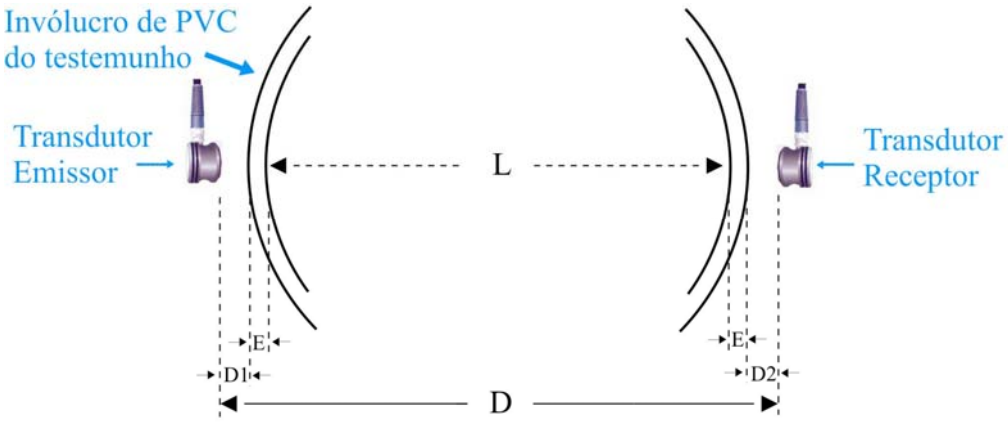


Figura 12 - Sistema de medição com a demonstração das distâncias

Assim, pode-se considerar o tempo total (*T*) de propagação da onda no sistema como sendo:

$$T = T_1 + Tpvc + Tsed + Tpvc + T_2 \tag{16}$$

que, com base na equação (15), pode ser descrito como:

$$T = \frac{D_1}{Cágua} + \frac{2E}{Cpvc} + \frac{L}{Csed} + \frac{D_2}{Cágua} \tag{17}$$

O método utilizado neste trabalho tem como base a diferença entre os tempos de propagação da onda sonora, para uma medição em um tubo de PVC cheio de água, seguido de uma medição no testemunho real com sedimento marinho. Com este método foi possível eliminar o fator na equação que considerava a propagação no PVC. Logo, foram realizadas duas medições no sistema. A primeira mediu o tempo de propagação em um tubo de PVC, idêntico ao tubo do testemunho, cheio de água. Esta medição também serviu como calibração do sistema, uma vez que o valor a ser encontrado para a velocidade da água deveria ser igual, ou próximo, a 1.493,4 m/s, que é o valor tabelado para propagação na água doce a 24° C. A segunda medição foi realizada no testemunho.

Para a medição na água:

$$Tágua = \frac{D_1}{Cágua} + \frac{2E}{Cpvc} + \frac{L}{Cágua} + \frac{D_2}{Cágua} \tag{18}$$

Para a medição no testemunho, também foi utilizada a equação (17), apenas considerando o tempo total de propagação da onda (*T*) como sendo o tempo total de propagação no sistema com o testemunho (*Tsed*).

Subtraindo (18) por (17), são eliminados os termos $\frac{D_1}{Cágua}$, $\frac{2E}{Cpvc}$ e $\frac{D_2}{Cágua}$, e encontra-se:

$$Tágua - Tsed = \frac{L}{Cágua} - \frac{L}{Csed} \tag{19}$$

Esta diferença apresentada em (19) pode ser denominada como ΔT . Conceitualmente, este valor é o atraso do sinal de propagação na água (calibração) em relação ao sinal do testemunho (sedimento). Logo:

$$\Delta T = \frac{L}{Cágua} - \frac{L}{Csed} \tag{20}$$

Desenvolvendo (20), chega-se à fórmula usada para o cálculo da velocidade de propagação no sedimento (*Csed*):

$$Csed = \left(\frac{1}{Cágua} - \frac{\Delta T}{L} \right)^{-1} \tag{21}$$

O valor de "D" é medido diretamente na ferramenta de perfilagem antes de cada processo de medição e varia para alguns testemunhos, conforme descrito na tabela I. Este valor serve como subsídio para o cálculo da velocidade da água (*Cágua*) ainda na calibração, utilizando-se a equação (15). A tabela I mostra que o *Cágua* calculado para cada testemunho também indica pequenas variações. Isto ocorre devido à variação de "D" e pela mudança na temperatura da água durante cada medição. Para corrigir estas diferenças, foi necessário introduzir no programa de processamento (*ultra_sed.mat*) os valores específicos de "D" e de *Cágua* correspondentes à cada testemunho.

O "*L*" é o diâmetro interno do tubo de PVC, tem o valor de 47,4 mm, e é fixo para todos os testemunhos.

O valor de ΔT é calculado no programa de processamento dos sinais (*ultra_sed.mat*) pelo método da correlação cruzada entre os sinais de calibração na água e os sinais originados pela propagação no testemunho.

A tabela abaixo relaciona, para cada testemunho, os valores da velocidade da água obtidos durante as calibrações e as medidas das distâncias entre os transdutores:

Tabela I – Velocidade da água e distância entre transdutores

Testemunho	*Cágua* (calibração para as linhas de medição 1 e 2) (m/s)	Distância entre transdutores (*D*) (mm)
n° 1	1.503,9	54,6
n° 2	1.494,8	54,3
n° 3	1.503,0	54,6
n° 4	1.502,2	54,6
n° 5	1.490,4	Linha 1 = 54,2 / Linha 2 = 54,4
n° 6	1.499,2	54,4
n° 7	1.497,0	54,5
n° 8	1.496,5	54,6
n° 9	1.503,3	54,1

Portanto, foram realizadas medições de velocidade para pontos ao longo do testemunho, posicionados a cada "cm" (Macedo *et al*., 2005b). Os resultados são apresentados em gráficos (Fig. 13), que mostram os perfis de velocidade do som para as duas linhas de medição (linha 1 e 2), em relação à posição correspondente. As linhas que unem os pontos que representam os valores da velocidade nos perfis, não são linhas de interpolação, são apenas linhas que ligam os pontos para facilitar a visualização.

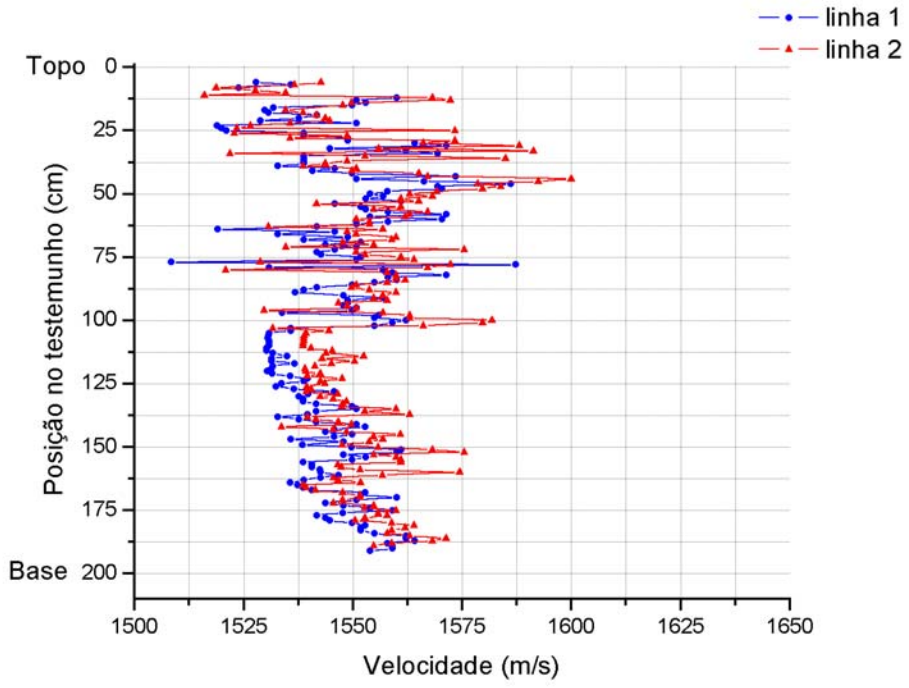


Figura 13 - Perfil de velocidade do som calculado para as linhas 1 e 2 do testemunho 05

6.1.2 - Método de Cálculo da Atenuação

O fenômeno da atenuação tem sido apresentado e analisado sob formas distintas, por diversos autores. Abaixo serão relacionados os exemplos adotados por Hamilton (1972), Frazer e Fu (1999), Gorgas *et al*. (2002), Ayres Neto (1998), Ayres e Theilen (2001), Kinsler *et al*. (1982) e He & Zeng (2001), sendo este último o método adotado nesta dissertação, uma vez que melhor atende a seus propósitos.

Hamilton (1972) descreve o fenômeno da atenuação em sedimentos marinhos em função da freqüência, fazendo uso da equação:

$$\alpha = K.f^{n} \qquad (22)$$

Onde:

"α" é a atenuação de ondas compressionais em dB/m;

"K" é uma constante;

"f" é a frequência; e

"n" é o expoente da frequência.

A relação entre a freqüência da onda (P) e atenuação do sinal tem importantes implicações na formação de parâmetros em modelos para sedimentos porosos.

De acordo com a análise de seus resultados e de experimentos disponíveis na literatura, Hamilton (1972) determinou o valor de "n" muito próximo de 1. Conseqüentemente, a única variável da equação (22) é a constante "*K*", que varia com a granulometria e a porosidade do sedimento. Outra importante observação é o fato de a atenuação variar de forma linear em função da frequência.

Para Frazer e Fu (1999), a atenuação é usada em muitos artigos como sinônimo de "α", mas na pesquisa destes autores este fenômeno é analisado por uma constante denominada "*A*", dada pela equação $A = Q^{-1}$, onde "Q" é um quantificador adimensional chamado de fator de qualidade acústica. O método utilizado por eles, e também por Gorgas *et al*. (2002), é uma aplicação da teoria de inversão e da razão espectral de sinais, utilizada principalmente em estudos relacionados à sísmica. Cabe ressaltar, que neste método a atenuação é aceita como independente da freqüência.

Para Kinsler *et al*. (1982), a atenuação é a redução da intensidade de energia de uma onda acústica que se propaga através de um meio, cujo valor varia em função da distância percorrida pelo sinal, sendo dependente da frequência.

Este fenômeno é expresso pela equação:

$$I = I_0 \, e^{-2\alpha x} \tag{23}$$

Onde:

- "x" é a distância percorrida pela onda ao se propagar no meio;
- "I_0" é a intensidade original do sinal, ou seja: quando $x = 0$;
- "I" é a intensidade após a onda percorrer uma determinada distância "x";
- "α" é o coeficiente de atenuação do meio na unidade de neper/m ou cm; e
- $\frac{I_0}{I}$ é a razão que representa a atenuação do sinal.

Desenvolvendo esta equação, tem-se:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -2\alpha \cdot x \;\text{ ; e} \tag{24}$$

$$\alpha = \frac{1}{2x}\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \tag{25}$$

Para o trabalho desenvolvido nesta dissertação, a onda de "US" percorre três meios distintos: a água, o tubo de PVC e o sedimento (Fig. 12). Conseqüentemente, o cálculo da atenuação (*att*), em função do coeficiente acima apresentado, torna-se complexo.

Como alternativa, foi empregado o método denominado "método da substituição" (He & Zeng, 2001), que usa como recurso o cálculo da atenuação por meio da razão $\frac{I_0}{I}$ (Kinsler *et al*., 1982; Fish, 1990; He & Zeng, 2001).

Nesta dissertação, esta razão foi calculada para sinais que se propagam em meios distintos. O primeiro deles é o sinal propagado em um tubo de PVC com água, idêntico ao testemunho. Este sinal é recebido com uma intensidade "$I_{água}$". O segundo sinal propagado é o recebido para o testemunho com sedimento, com intensidade de "I_{sed}". Este método utiliza como referência o valor da atenuação na água, que é próximo de zero e, portanto, desprezível para esta faixa de freqüência. Assim, é possível calcular a atenuação no sedimento em relação a um referencial, que no caso é a própria atenuação na água.

Hamilton (1972) menciona que a atenuação da água pode ser considerada como zero, sendo utilizada como referência para medidas.

As equações (26, 27, 28 e 29) descrevem este método (He & Zeng, 2001):

$$att = \frac{I_{água}}{I_{sed}} \tag{26}$$

Uma escala logarítmica (decibel-dB) é aplicada à equação (26) para melhor representar a grande quantidade de valores de intensidades encontradas na natureza. Logo, a atenuação, em função da frequência e da distância percorrida pelo sinal (D), é expressa em dB/m pela equação:

$$att_{dB}(f) = \frac{10}{D}\log\frac{I_{água}(f)}{I_{sed}(f)} \tag{27}$$

A equação (28) descreve a proporcionalidade existente entre a intensidade e a amplitude espectral do sinal no domínio da freqüência (Fish, 1990):

$$\frac{I(f)}{I_0(f)} = \left(\frac{A(f)}{A_0(f)}\right)^2 \tag{28}$$

Assim, desenvolvendo as equações (27) e (28), teremos:

$$att_{dB}(f) = \frac{20}{D}\log\frac{A_{água}(f)}{A_{sed}(f)} \tag{29}$$

O dado coletado no sistema (Fig. 6) é o sinal elétrico no domínio do tempo, em volts, correspondente ao pulso de "US" recebido pelo transdutor "RC".

Portanto, estes sinais propagados na água e nos sedimentos foram digitalizados e armazenados no osciloscópio. No programa denominado "*ultra_sed.mat*", desenvolvido em ambiente MatLab para cálculo da atenuação, os sinais armazenados da amplitude espectral no domínio do tempo foram convertidos em sinais de amplitude no domínio da frequência, utilizando o algoritmo "FFT" da Transformada de Fourrier. O mesmo programa executou os cálculos das razões de $A_{água}(f)/A_{sed}(f)$ e dos valores de atenuação (*att*), para cada ponto do testemunho e para cada frequência. Os resultados destas medições são apresentados em diagramas em 3D (Fig. 15), que tem em seu eixo vertical o resultado da atenuação em dB/m e, em seus eixos horizontais, a posição em cm ao longo do testemunho e o espectro de freqüência.

As freqüências utilizadas neste cálculo foram separadas em uma faixa do espectro, representando uma janelamento do sinal. Sobre este aspecto, cabe ressaltar que o transdutor transmissor foi operado para emitir um pulso, conseqüentemente, durante a propagação da onda todo o espectro de freqüências foi gerado. Portanto, apesar da freqüência fundamental do

transdutor receptor ser de 2,25 MHz, este registrou todo o espectro. Para melhor representar os valores de atenuação, foram escolhidas as freqüências que chegaram ao receptor com maior energia, ou seja, maior amplitude no sinal.

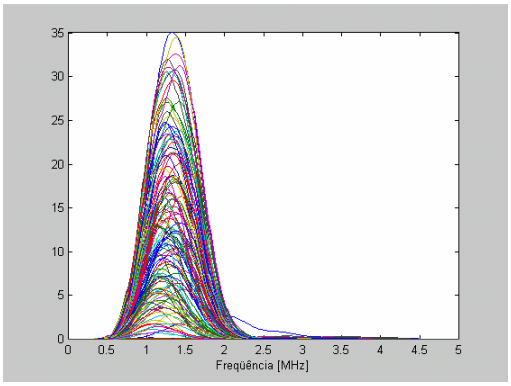


Figura 14 – Gráfico de amplitude do espectro em função da frequência, medido para o testemunho 2

A figura 14 mostra um gráfico com as amplitudes de freqüências. Cada cor representa um ponto de medição, em cm, ao longo do testemunho. O eixo vertical indica valores representativos de uma escala de amplitude, e o eixo horizontal o espectro de freqüências. Neste gráfico observa-se claramente que os pontos de maior energia estão associados às freqüências entre 1 e 1,5 MHz, e que as freqüências maiores que 1,7 MHz foram bruscamente atenuadas. Sendo assim, foi adotado como método de cálculo da atenuação, a utilização do espectro centrado na freqüência relacionada a maior energia, sendo este espectro janelado em 300 pontos de amostragem para maior e 300 pontos para menor. Por este motivo, os gráficos de atenuação em 3D mostram faixas de freqüências que variam de 0,6 a 1,6 MHz.

Logo, para cada posição no testemunho, onde foi realizada a emissão de um pulso de "US", tem-se uma leitura conjunta do espectro da atenuação naquele ponto, em função da freqüência.

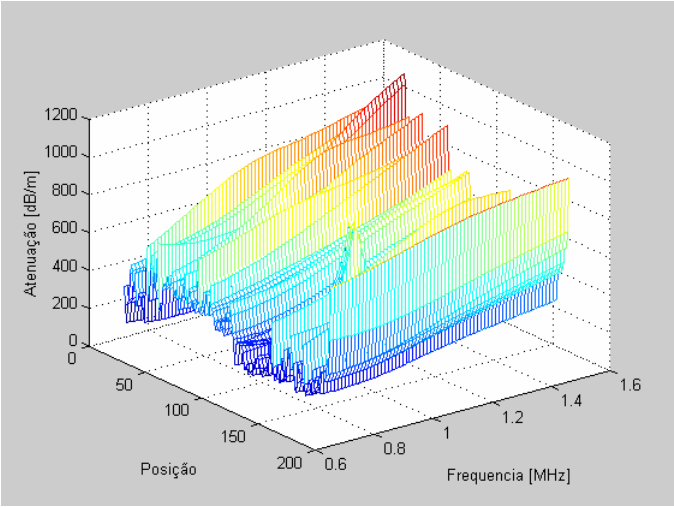


Figura 15 - Diagrama de atenuação em função da freqüência (na linha 2 do testemunho 5)

6.2 - Calibração do Sistema

Antes da execução das primeiras medições nos sedimentos, foi necessário calibrar o sistema (Macedo *et al.*, 2005). Inicialmente foi utilizado o próprio tubo de PVC do testemunho, cheio de água. Nesta fase foram realizadas medições em linhas longitudinais ao testemunho, estas defasadas de 90° (Fig. 10), em um processo semelhante ao método de medição nos sedimentos. Em uma segunda fase, as medições foram feitas em posições pré-determinadas sobre duas linhas circulares ao testemunho (Fig. 18). A terceira calibração consistiu em construir um testemunho com sedimentos conhecidos (areia fina, argila e areia média), obtidos no laboratório de sedimentologia da UFF, e submetê-los a medições.

Os principais objetivos destas três fases de calibração foram:

- verificar se o método utilizado para o cálculo da "Vp" e da atenuação, eliminava qualquer tipo de alteração que o invólucro de PVC poderia causar na propagação da onda;

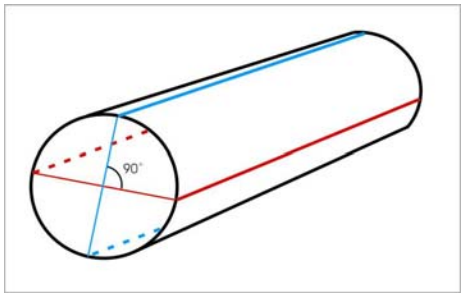
- verificar se os valores medidos nas amostras construídas com água e sedimentos de laboratório estavam de acordo com os valores conhecidos e tabelados;

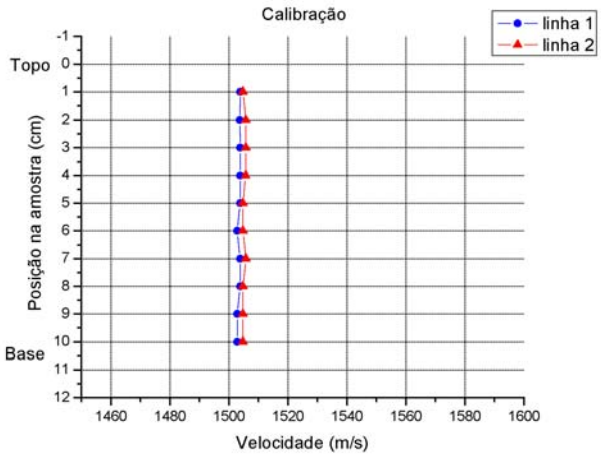
- verificar se o sistema era capaz de detectar interfaces nas camadas de sedimentos; e

- verificar se o sistema era capaz de identificar faixas de valores de atenuação distintas para cada tipo de sedimento.

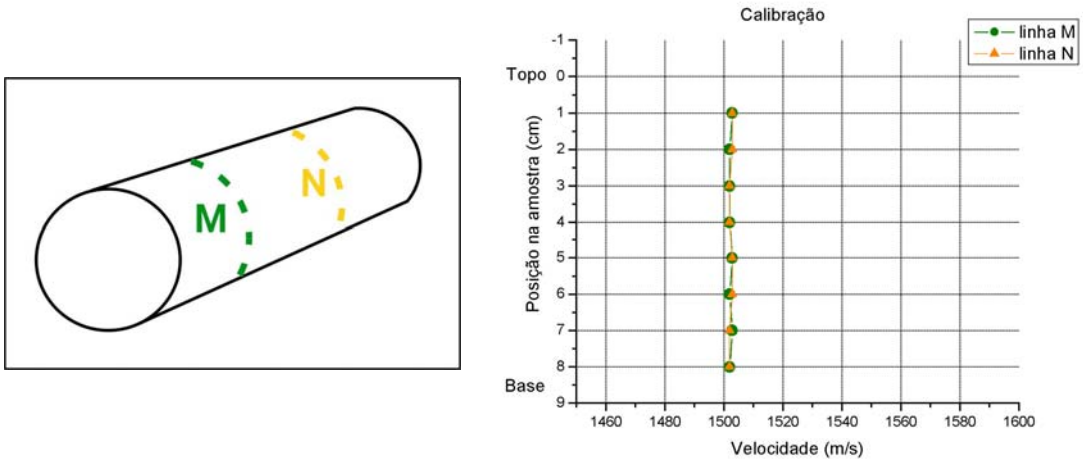
Como resultado, foi possível observar que:

- na calibração com a amostra cheia de água, os valores calculados para a velocidade variaram de 1.502 a 1.506 m/s, a uma temperatura de 24° C (Figs. 17 e 19), tanto para as medições longitudinais (Fig. 16), quanto para as circulares (Fig. 18). Logo, os resultados foram considerados satisfatórios, com uma diferença de cerca de 0,8 %, quando comparados aos tabelados: 1.493,7 m/s, (Sun e Ying, 1999).





Figuras 16 e 17 – Calibração – fase 1. Linhas longitudinais (1 e 2)



Figuras 18 e 19 – Calibração – fase 2. Linhas circulares (M e N)

- na calibração com a amostra composta por sedimentos conhecidos (Fig. 20), os valores calculados para as velocidades (areia fina: de 1563 m/s a 1572 m/s, argila: de 1442 m/s a 1474 m/s e areia média: de 1576 m/s a 1608 m/s) são próximos aos tabelados na literatura (Shumway, 1960; McLeroy and DeLoach, 1968; Hamilton, 1980; Maa *et al*., 1997). A pequena diferença, para menor, existente em relação aos valores tabelados, pode ser justificada pelo modo como a amostra foi construída (em laboratório), estando susceptível a formação de um número maior de bolhas de ar. Hamilton (1972) relata que o principal problema para medições em laboratório de sedimentos saturados por água, ou para amostras construídas artificialmente, é a presença de ar trapeado nos espaços porosos.

- Pode-se afirmar que as interfaces existentes na amostra controlada, areia fina para argila e argila para areia média, foram claramente identificadas pela variação de velocidade no perfil plotado no gráfico (Fig. 20). A própria diferença, nos valores medidos nos dois tipos de areia, pode ser notada neste perfil.

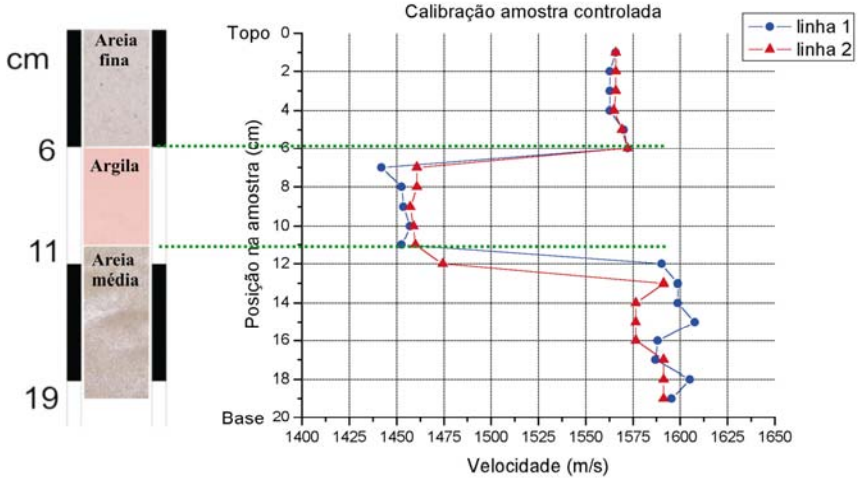


Figura 20 – Calibração – fase 3. Perfis de velocidade (sedimentos conhecidos)

- com relação à atenuação, os diagramas abaixo mostram os valores em dB/m, em função da freqüência e referentes a cada posição em cm ao longo do testemunho (Fig. 21). Apesar de a linha 2 apresentar valores menores que a linha 1, este resultado já era esperado, uma vez que a atenuação é um fenômeno difícil de se medir em meios viscoelásticos (Hamilton, 1980; Gorgas *et al*., 2002; Buckingham, 2005).

No entanto, os diagramas fornecem informações coerentes com o fenômeno. Quando comparamos os valores medidos entre as areias e a argila, nota-se claramente que a atenuação provocada pela argila no pulso de "US" é muito maior do que o efeito nas areias, o que está de acordo com o publicado na literatura (Hamilton, 1972, 1980; Stoll, 1980, 1985; Leurer, 1997).

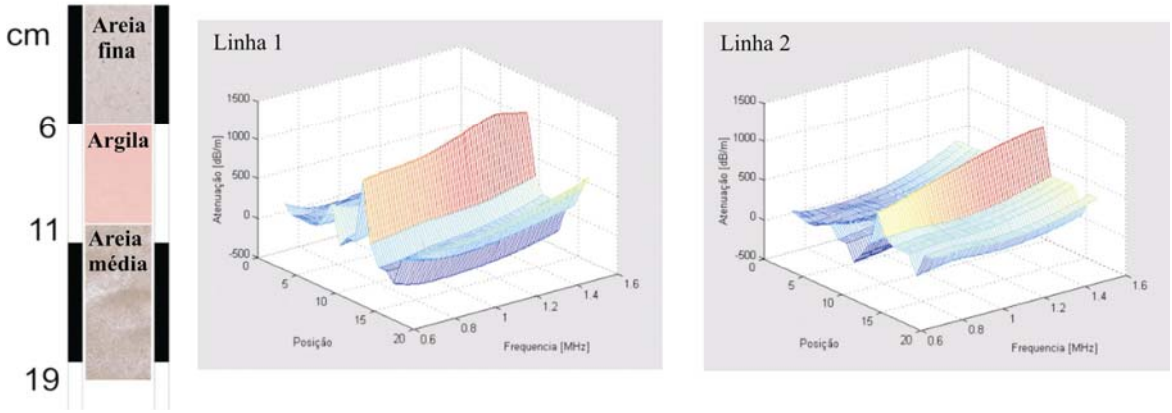


Figura 21 – Calibração – fase 3. Diagramas de atenuação para as linhas 1 e 2 da amostra com sedimentos controlados

Sendo assim, os resultados observados na calibração foram satisfatórios e atenderam aos objetivos de planejamento.

6.3 - Coleta dos Testemunhos, Descrição e Granulometria

No método de coleta dos testemunhos, foi utilizado o testemunhador a pistão tipo Kullenberg (Fig. 22). Os mesmos foram coletados na área de pesquisa (Figs. 1 e 3) durante a Comissão DIADORIM II – 2005. Este dispositivo foi operado na embarcação do IEAPM (AvPqOc "Diadorim"), utilizando o seu pau de carga de 6 m de altura e o seu guincho principal. O equipamento operou de modo satisfatório, uma vez que foram coletados testemunhos de até 2,19 m de comprimento.

No total, foram coletados 9 testemunhos com diâmetro de 50 mm, e de comprimentos que variam entre 60 e 219 cm (Tabela II). Foram selecionados pontos para a coleta do material que permitissem uma maior variabilidade do tipo de sedimento (Artusi *et al*., 2005).

Tabela II – Localização e características dos testemunhos coletados (Artusi *et al*., 2005).

Amostra	Latitude (S)	Longitude(W)	Profun-didade da Coleta (m)	Comprimento do Testemunho (m)	Classificação visual do sedimento na base do testemunho
1	22°59´26.0”	042º02´09.5”	41,2	0,72	areia média e fina
2	23°00´10.6”	042º01´29.6”	49,4	1,52	areia fina
3	23°00´26.8”	042º01´13.0”	52,1	0,61	areia média com conchas
4	23°02´31.7”	041º59´58.9”	93,5	0,83	areia grossa com conchas
5	23°00´09.0”	041º58´06.6”	63,3	2,06	lama
6	23°01´30.7”	042º00´06.0”	87,5	1,02	areia grossa com conchas.
7	23°06´05.4”	041º58´01.0”	110,5	2,18	lama
8	23°11´58.0”	042º08´03.0”	119,5	0,81	areia média e lama
9	23°02´05.0”	041º59´31.4”	90,5	2,19	lama arenosa com conchas

Os testemunhos foram selados nas extremidades com tampas, de forma a impedir a entrada de ar e/ou o vazamento de água, tentando preservar ao máximo a integridade do material. Portanto, a diferença existente entre o comprimento total dos testemunhos descritos na tabela II e os comprimentos apresentados na descrição dos testemunhos (apêndice I), ocorre devido ao tamanho das tampas, que foram retiradas e não representam áreas de medição.

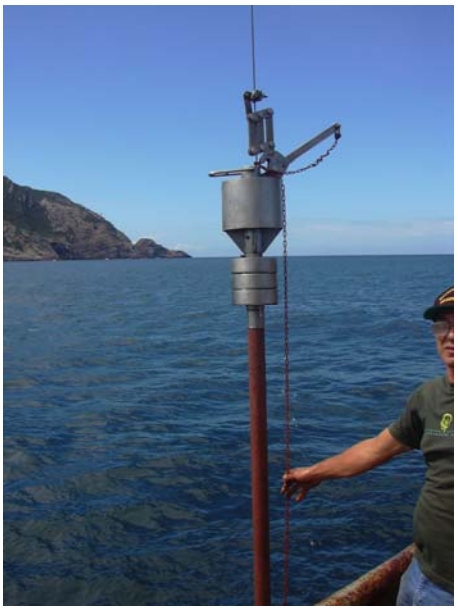


Figura 22 – Testemunhador à pistão tipo Kullenberg

A classificação de sedimentos, baseada em parâmetros granulométricos e composicionais, é de fundamental importância para individualização de conjuntos faciológicos, para determinação das características dos ambientes deposicionais e, no que diz respeito a este trabalho, para a caracterização dos perfis sônicos e de atenuação.

Após a coleta, os testemunhos foram abertos, fotografados e foi realizada a descrição sedimentológica com a finalidade de caracterizar e classificar o material. As descrições completas de cada testemunho são apresentadas no apêndice I, numeradas de 1 a 9.

Para auxiliar a descrição dos testemunhos, foi efetuada a análise granulométrica dos sedimentos, subamostrados nos testemunhos em intervalos de 5 e 10 cm. Os dados de granulometria são apresentados de forma detalhada no apêndice III.

O método de análise granulométrica adotado foi baseado no processo de peneiramento, para sedimentos grossos, e no processo indireto de sedimentação e separação por pipetagem, para os sedimentos finos; ambos descritos por Suguio (1973).

Em uma abordagem mais genérica, a classificação dos sedimentos marinhos foi baseada no conjunto de três métodos tradicionais, adaptados às condições da plataforma continental brasileira. O primeiro método segue a escala granulométrica de Wentworth (Tabela III), que classifica o sedimento de acordo com o tamanho do grão (Krumbein e Pettijohn, 1988). O segundo, que classifica os sedimentos no que diz respeito aos teores de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), fundamenta-se na tabela de Larsonneur (Dias, 1996). As frações granulométricas dominantes e os teores de lama foram classificados utilizando o diagrama triangular de Shepard (1954), onde são utilizadas proporções relativas de cascalho, areia e lama (Fig. 23A).

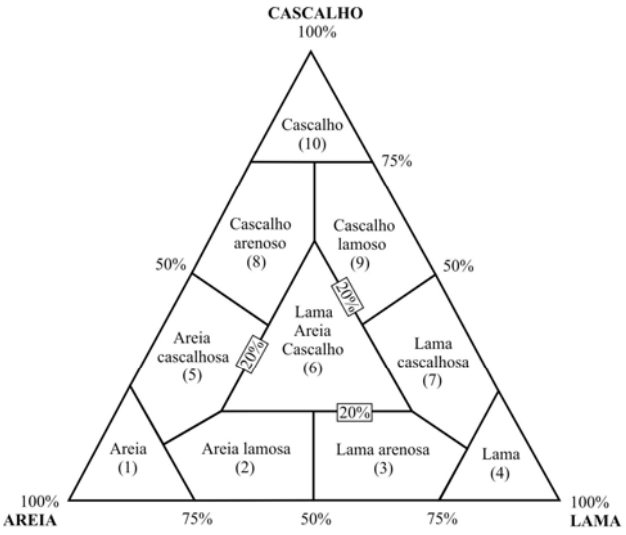


Figura 23A - Triângulo de classificação de sedimentos (Shepard, 1954)

Sete (7) tipos de sedimentos foram identificados nos nove (9) testemunhos coletados: areias grossas, médias e finas, areia lamosa, lama arenosa, lama compactada (ou consolidada) e lama fluida. Para facilitar a descrição sedimentológica deste material (apêndice I), a legenda abaixo foi criada (Fig. 23B), tendo como base símbolos geológicos padronizados (US Geologic Survey, 2000).

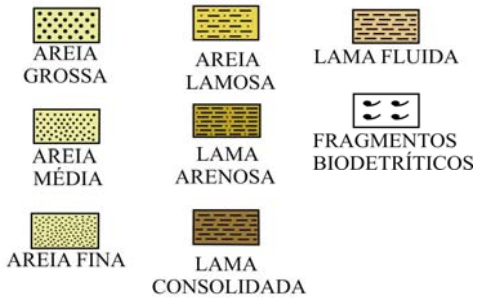


Figura 23B – Legenda com a identificação dos diferentes tipos de sedimentos identificados nesta dissertação

Do ponto de vista dos teores de carbonato, Dias (1996) estabeleceu as seguintes categorias de sedimentos: litoclásticos (30% de carbonatos), lito-bioclásticos (30 a 50 % de carbonatos), bio-litoclásticos (50 a 70 % de carbonatos) e bioclásticos (70% de carbonatos).

Do ponto de vista granulométrico, seis categorias foram evidenciadas: seixos (S), grânulos (G), areia fina (AF), areia média (AM), areia grossa (AG) e lamas (L), seguindo os critérios apresentados na tabela III.

Tabela III – Escala granulométrica de Wentworth (modificado de Krumbein e Pettijohn, 1988)

Tipo de sedimento	Dimensão do grão (mm)
Seixos	de 4 a 65
Grânulos	de 2 a 4
Areia grossa	de 0,5 a 2
Areia média	de 0,25 a 0,5
Areia fina	0,062 a 0,25
Lama	< que 0,062

7 - RESULTADOS

Após a realização dos três procedimentos de calibração do sistema, conforme descrito no item 6.2, foi iniciada a aquisição de dados de propagação de onda compressional nos sedimentos marinhos, utilizando a bancada de medições do Laboratório de Ultra-som do Programa de Engenharia Biomédica da COPPE. Foram executadas aproximadamente 2.550 medições, nos nove testemunhos coletados na área de pesquisa. Não foi possível medir a temperatura do sedimento nas amostras, porque os testemunhos estavam fechados. No entanto, a temperatura da água onde os testemunhos foram mergulhados, após um período de estabilização, variou entre 23° e 24° C.

Os resultados de velocidade foram plotados em gráficos (perfis) de velocidade do som (Vp), em relação à posição no testemunho. Estes perfis são apresentados neste capítulo ao lado de uma representação simplificada da descrição sedimentológica do testemunho, construída com base nos dados obtidos na análise granulométrica (apêndice III). A descrição completa de cada testemunho é apresentada no apêndice I. A análise da variação do comportamento da onda sonora no meio foi realizada pela comparação do perfil “Vp” com a representação simplificada da granulometria.

Os resultados de atenuação são apresentados em diagramas em 3D, em função da freqüência e também em relação à posição no testemunho.

Os testemunhos 1 (Figs. 24 e 25) e 3 (Figs. 26 e 27) são abordados em conjunto devido à semelhança de material. Ambos são compostos, em sua integridade, por areias médias e fragmentos biodetríticos que aumentam de tamanho em direção à base. Porém, as frações granulométricas são distintas, conforme demonstrado no apêndice III (A-III-1 e A-III-5).

Nas proximidades do topo, no trecho entre os pontos 5 e 11 cm, onde não há nenhum tipo de fragmento biodetrítico, os perfis de “Vp” das linhas 1 e 2 são mais uniformes, registrando para o testemunho 1 velocidades que variam de 1.580 m/s a 1.675 m/s e, para o testemunho 3, valores de 1.555 m/s a 1.570 m/s.

É válido ressaltar, que na linha 2 do testemunho 1 e nas linhas 1 e 2 do testemunho 3, não há propagação nos primeiros pontos medidos (até o ponto 5 cm), apesar de não haver fragmentos que pudessem causar espalhamento no sinal. Uma hipótese para esta ausência de registro é a possibilidade de ter ocorrido perda de água na amostra (desidratação do material), devido à proximidade da tampa de vedação do testemunho.

Após o ponto 12 cm, para ambos os perfis de Vp, os valores medidos são maiores e passam a ter maior variabilidade. A maior velocidade medida para o testemunho 1 foi de 1.752 m/s, enquanto que no testemunho 3 (Fig. 26) foi de 1.688 m/s. Devido à existência de fragmentos de conchas após o ponto 12 cm, em vários trechos não há registro do sinal no receptor e as medidas passam a ser isoladas. À medida que aproxima-se da base, o sinal se perde totalmente, com o aumento da quantidade e do tamanho dos fragmentos de conchas.

No método adotado por este trabalho para cálculo da atenuação, conforme mencionado no item 6.1.2, os valores obtidos não podem ser expressos de modo absoluto, conforme feito com a velocidade, uma vez que há uma variação da atenuação em função da frequência. Logo, os resultados serão descritos em valores aproximados e a análise será apresentada de modo comparativo, entre os diversos tipos de sedimento. Segundo Frazer e Fu (1999), extrair dados de atenuação em sedimentos marinhos é muito mais difícil que dados de velocidade, tendo em vista que a atenuação é mais sensível a ruídos e aos efeitos de anisotropia.

Poucos são os experimentos disponíveis na literatura que registraram medidas de atenuação de onda compressional em altas freqüências, ou seja, na faixa de 1 a 2 MHz (Hamilton, 1972).

O registro da atenuação na linha 1 do testemunho 1 (Fig. 25) é bastante regular e linear. Os valores máximos estão próximos de 1.400 dB/m, para a freqüência de 1,6 MHz. A linha 2 deste mesmo testemunho não é muito regular, mas apresenta uma certa linearidade. Os valores máximos medidos também são próximos a 1.400 dB/m.

O comportamento da atenuação no testemunho 3 (Fig. 27) é distinto do testemunho 1, apesar de o material ser o mesmo. Os valores máximos não são regulares e a atenuação de 1.400 dB/m, para a freqüência de 1,6 MHz, não aparece em toda extensão do testemunho. A atenuação é basicamente dividida em três trechos: no primeiro, de 0 a 10 cm, há um pico de cerca de 1.200 dB/m, para a freqüência de 1 MHz; no segundo, compreendido entre o ponto 10 e o ponto 25 cm, é mais regular e linear, apresentando valores máximos de 1.000 dB/m para a linha 1 e 800 dB/m para a linha 2; e o terceiro trecho, que vai de 25 cm até o final, mostra um pico de 1.500 dB/m na linha 1 e 1.250 dB/m na linha 2.

Resumindo, considerando valores aproximados e principalmente os resultados do testemunho 1, pode-se afirmar que a atenuação medida para areias médias, na freqüência de 1,6 MHz, tem valores na faixa de 1.100 a 1.300 dB/m.

TESTEMUNHO 1 – PROPRIEDADES GEOACÚSTICAS (VELOCIDADE)

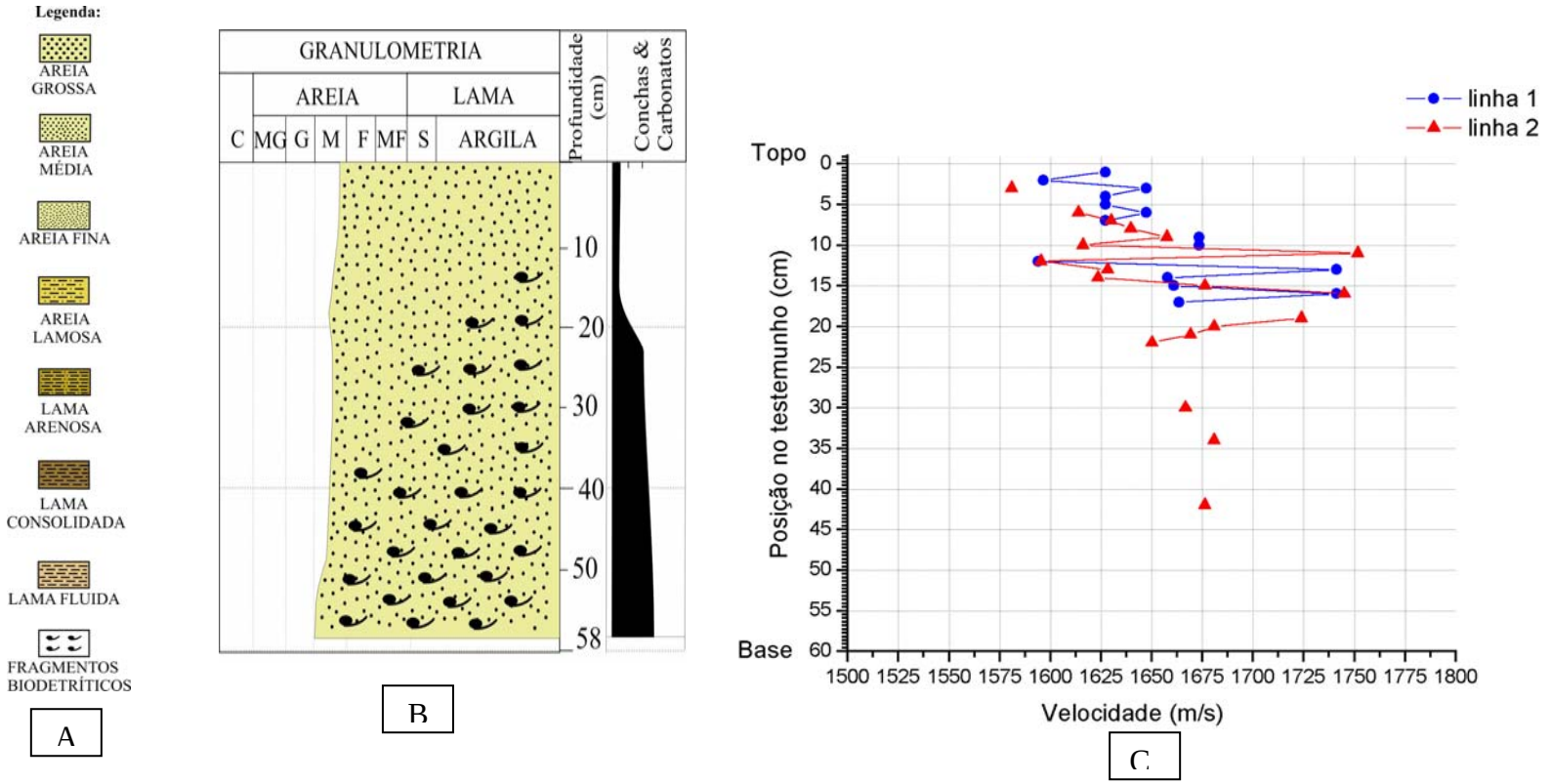


Figura 24 – Testemunho 1. A) Legenda. B) Desenho esquemático da litologia do testemunho. C) Perfis de velocidade do som medidos em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

ATENUAÇÃO

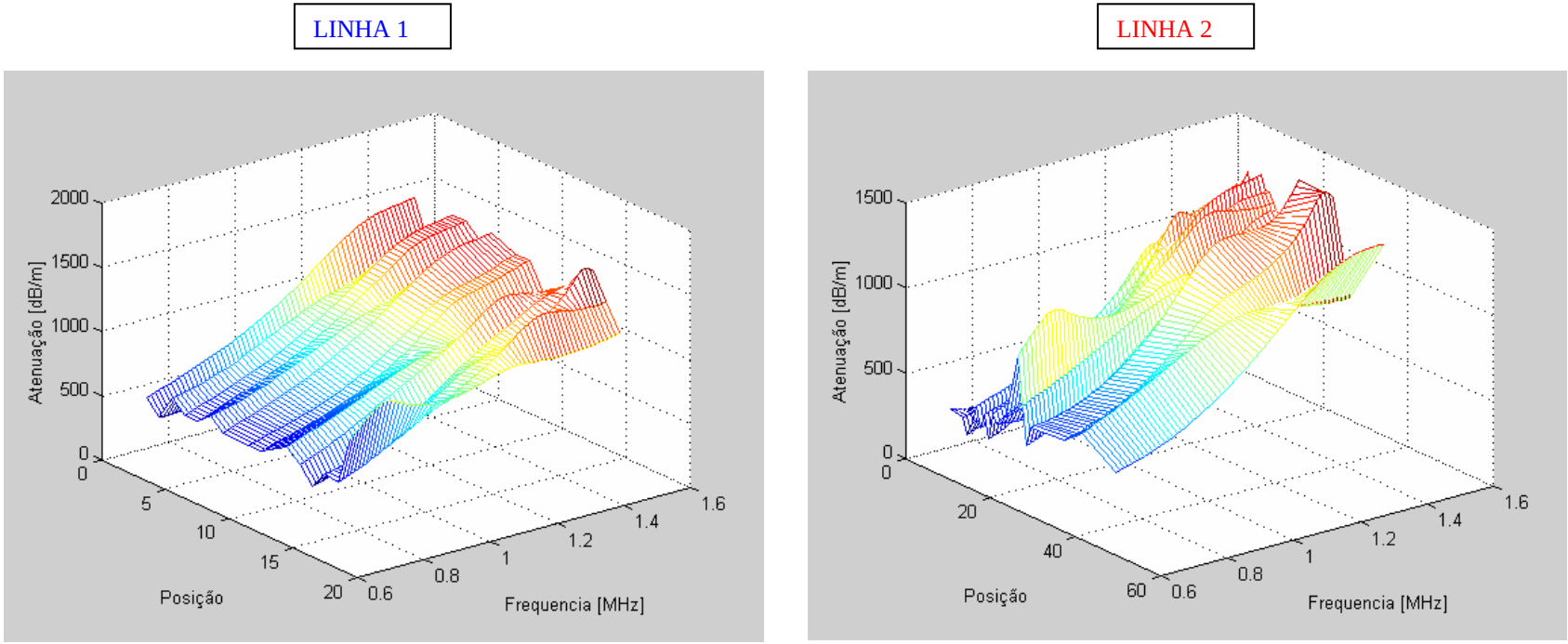


Figura 25 – Testemunho 1. Diagramas de atenuação representativos de medidas realizadas em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

TESTEMUNHO 3 – PROPRIEDADES GEOACÚSTICAS (VELOCIDADE)

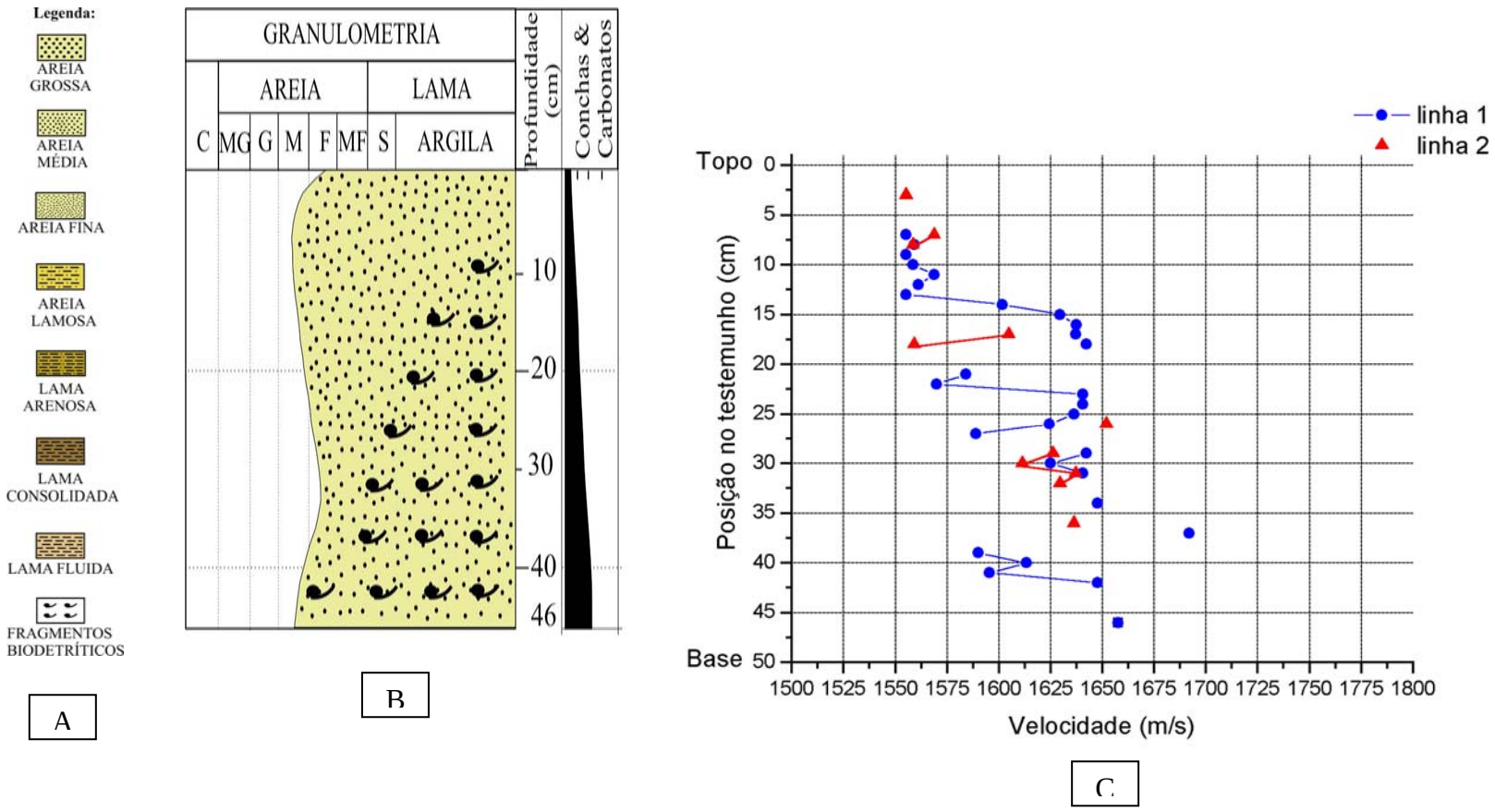


Figura 26 – Testemunho 3. A) Legenda. B) Desenho esquemático da litologia do testemunho. C) Perfis de velocidade do som medidos em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

ATENUAÇÃO

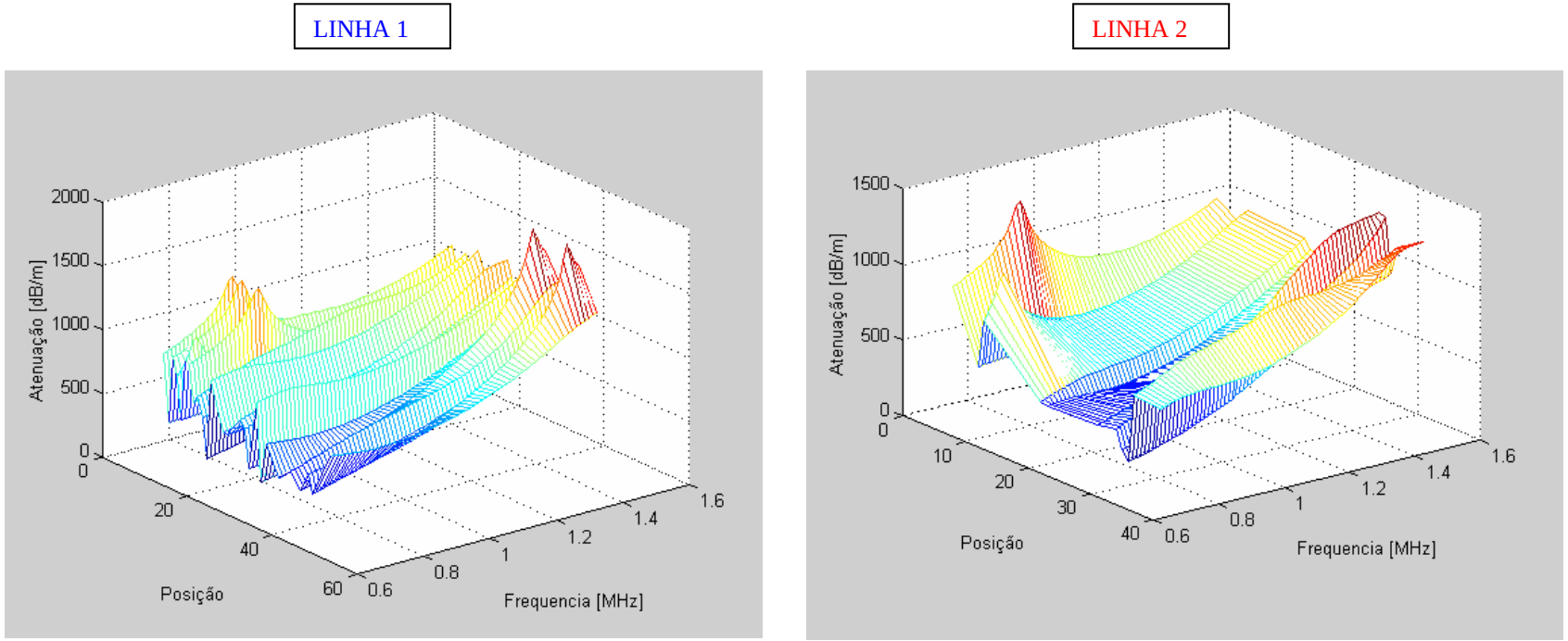


Figura 27 – Testemunho 3. Diagramas de atenuação representativos de medidas realizadas em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

O testemunho 2 (Fig. 28), composto por areias finas e uma estreita camada de areia lamosa, apresenta um perfil sônico muito uniforme, com pequenas oscilações de valor. Na areia fina, a faixa de valores de velocidade está entre 1.635 m/s (mínima) e 1.715 m/s (máxima). No trecho de areia lamosa (entre os pontos 23 e 26 cm), o registro sônico da linha 1 mostra uma queda acentuada de valor, atingindo 1.566 m/s. Nas proximidades do ponto 130 cm, pode-se notar outra queda no valor da velocidade, atingindo 1.610 m/s na linha 2 e 1.637 m/s na linha 1.

O registro da atenuação (Fig. 29), sob um ponto de vista genérico, é regular e uniforme para as linhas 1 e 2, indicando valores de cerca de 400 dB/m para a freqüência de 1,6 MHz. Algumas variações pontuais são observadas ao longo do testemunho. Na linha 1, há registros de 750 dB/m nas proximidades dos pontos 25, 40, 85 e 130 cm, para a freqüência de 1,6 MHz. Na linha 2, estes valores são notados nos trechos de 25 a 30cm, 125 a 135 cm, e no ponto 85 cm. Os valores máximos de atenuação, cerca de 1.300 dB/m para 1,6 MHz, são registrados nas linhas 1 e 2, entre os pontos 20 e 27 cm, coincidente com a camada de areia lamosa que está inserida entre as areias finas. Um outro pico de cerca de 1.100 dB/m foi registrado na linha 2, nas proximidades do ponto 90 cm.

Logo, respeitando-se as limitações de medições de atenuação, pode-se afirmar que nas areias finas os valores medidos estão na faixa de 400 a 700 dB/m, na freqüência de 1,6 MHz. Para a areia lamosa, os valores sobem para cerca de 1.300 dB/m, na mesma freqüência.

TESTEMUNHO 2 – PROPRIEDADES GEOACÚSTICAS (VELOCIDADE)

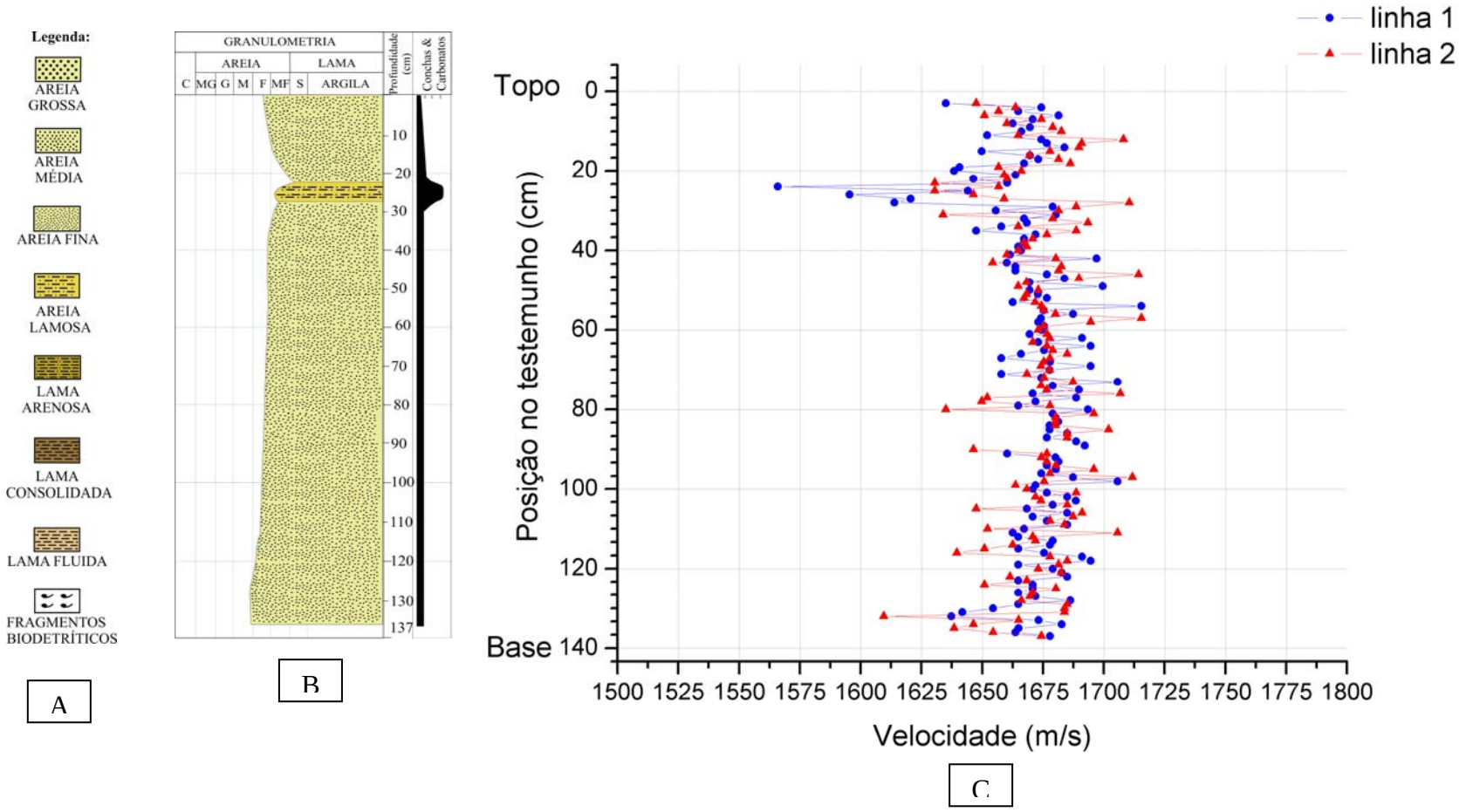


Figura 28 – Testemunho 2. A) Legenda. B) Desenho esquemático da litologia do testemunho. C) Perfis de velocidade do som medidos em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

ATENUAÇÃO

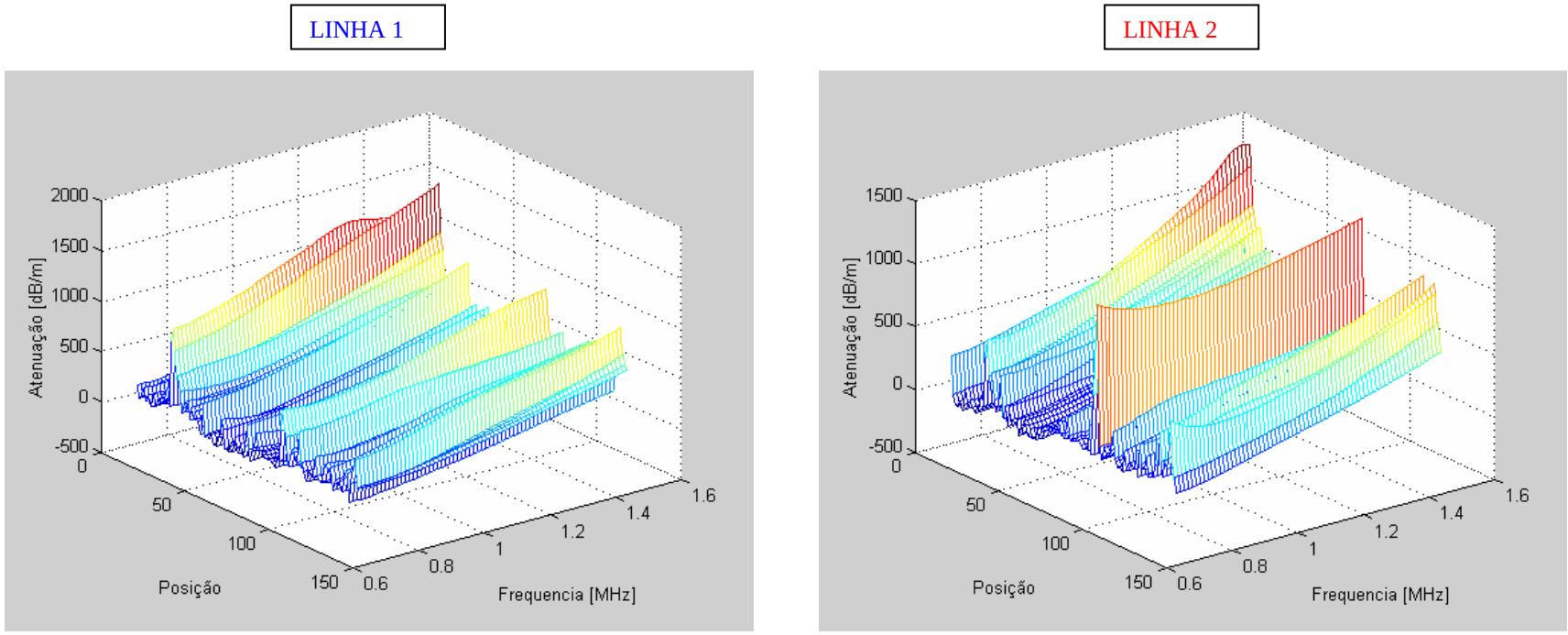


Figura 29 – Testemunho 2. Diagramas de atenuação representativos de medidas realizadas em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

Os primeiros 20 cm do testemunho 4 (Fig. 30) indicam, para ambas as linhas, valores de Vp com certa uniformidade, variando de 1.503 a 1.547 m/s. A partir do ponto 22 cm, há um salto no valor da velocidade para a faixa de 1.600 a 1.626 m/s, valores estes que permanecem regulares até o ponto 29 cm. Após este último ponto, os valores deixam de ter consistência e passam a ter registros isolados. Após o ponto 49, o sinal se perde totalmente. Considerando o tipo de material existente neste trecho, conchas e fragmentos com alta capacidade de provocar espalhamento no sinal, os valores medidos após o ponto 29 cm podem ser descartados.

Os diagramas de atenuação (Fig. 31) para este testemunho apresentam-se com bastante irregularidade, o que já era esperado pela própria heterogeneidade da litologia. Na linha 1, o maior registro de atenuação, cerca de 1.800 dB/m, para 1,6 MHz, se dá nas proximidades do ponto 20 cm. Na linha 2, há diversos pontos com atenuação superior a 1.300 dB/m, para 1,6 MHz, nos primeiros 25 cm do testemunho. Após este ponto, os valores caem até 1.000 dB/m e, próximo ao ponto 40 cm, último registro de sinal neste testemunho, há um pico que eleva o valor para próximo a 1.500 dB/m (freqüência de 1,6 MHz).

Como os gráficos das linhas 1 e 2 estão bastante distintos, fica difícil relacionar alguma faixa de valor de atenuação ao tipo de sedimento. O único trecho onde há uma coincidência de valores, é nas proximidades do ponto 20 cm, onde exatamente há uma transição da camada de lama arenosa para areia lamosa. A partir deste ponto, os valores de atenuação que, apesar de apresentarem uma pequena defasagem entre as linhas, mostram-se superiores quando comparados à atenuação da seção anterior (de 0 a 20 cm). Portanto, a única afirmação possível de se fazer para este testemunho, é que a atenuação na areia lamosa está na faixa de 1.400 a 1.500 dB/m.

TESTEMUNHO 4 – PROPRIEDADES GEOACÚSTICAS (VELOCIDADE)

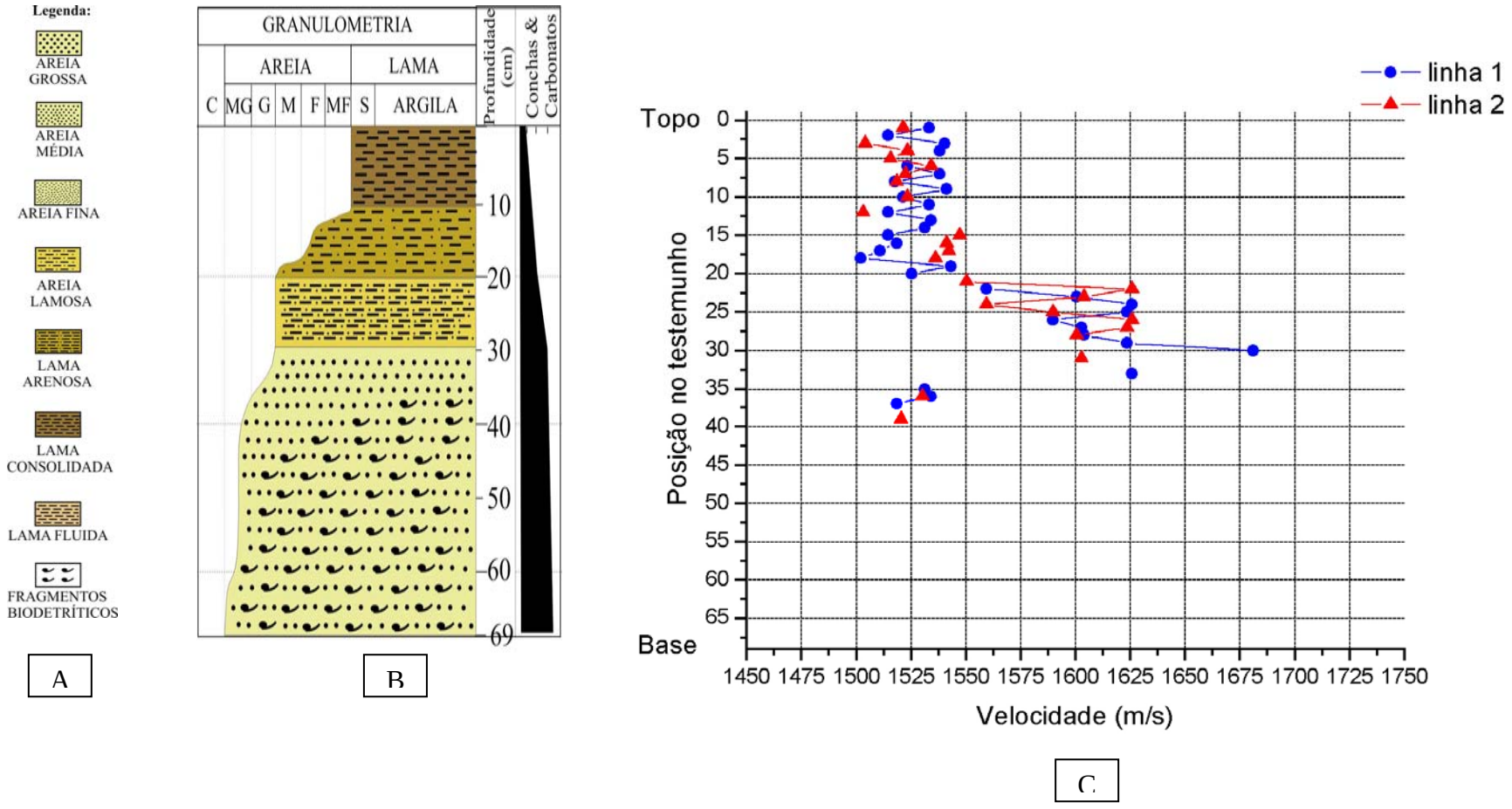


Figura 30 – Testemunho 4. A) Legenda. B) Desenho esquemático da litologia do testemunho. C) Perfis de velocidade do som medidos em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

ATENUAÇÃO

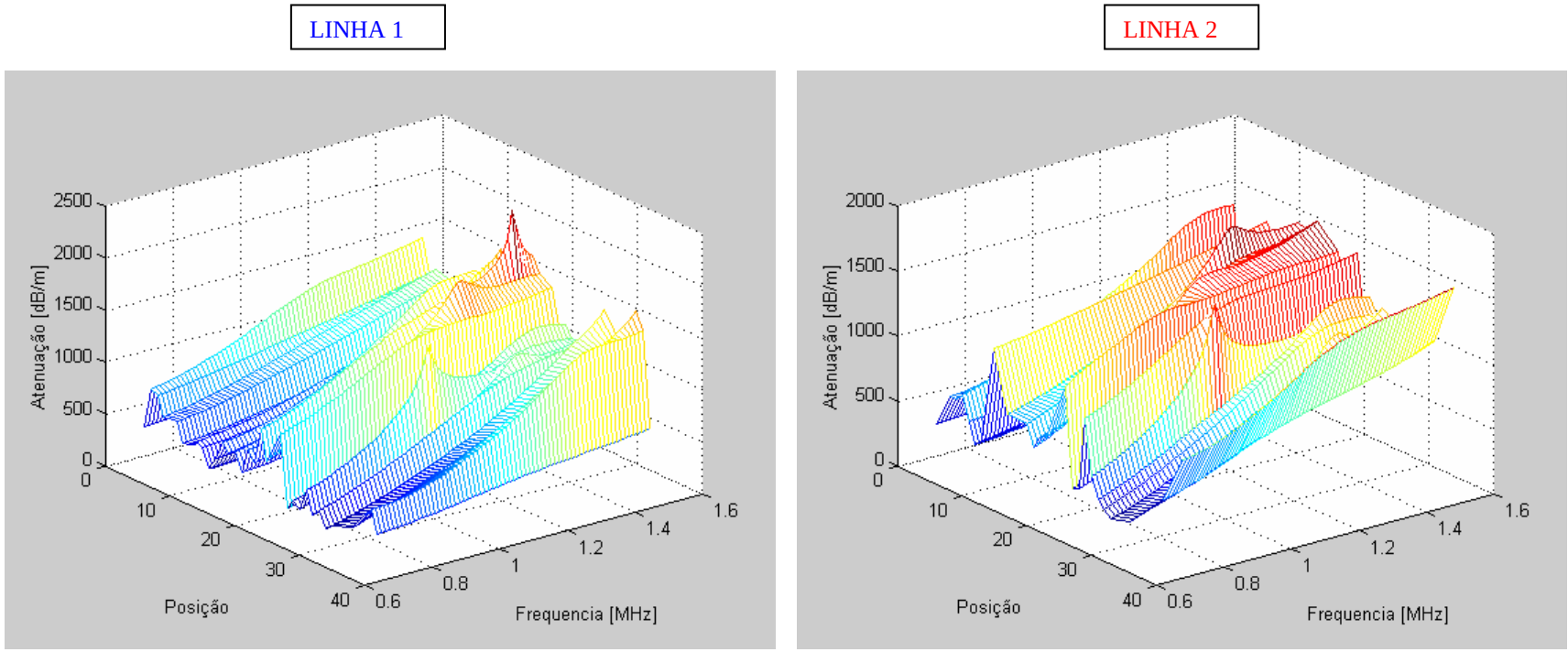


Figura 31 – Testemunho 4. Diagramas de atenuação representativos de medidas realizadas em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

Os testemunhos 5 (Figs. 32 e 33) e 7 (Figs. 34 e 35) serão abordados conjuntamente devido a sua semelhança. Ambos têm em sua composição camadas de lama fluida e também camadas de lama consolidada (compactada). A ocorrência de conchas e fragmentos é pequena. Uma estreita camada de lama arenosa é encontrada no testemunho 7, nas proximidades do ponto 60 cm, onde pode ser notada uma súbita elevação da Vp, atingindo o valor máximo de 1.639 m/s. Desconsiderando esta exceção, os perfis sônicos são uniformes e regulares, com uma semelhança significativa entre as linhas 1 e 2 de ambos os testemunhos. Para as lamas consolidadas, os valores de velocidade medidos variaram de 1.508 a 1.600 m/s. As lamas fluidas forneceram medidas de 1.530 a 1.563 m/s. Curiosamente, os valores de Vp medidos no testemunho 5 são cerca de 10 m/s mais altos que os medidos no testemunho 7. Esta diferença pode estar associada à temperatura da água no momento da calibração. A amostra 5 foi calibrada a 22° C, e a amostra 7 a 24° C, o que implica em velocidades mais altas no sedimento, para a amostra calibrada na menor temperatura (equação 22). Hamilton (1980) cita que a velocidade do som na água aumenta com o aumento da temperatura.

No testemunho 5 (Fig. 32), há uma queda brusca no valor da Vp nas proximidades do ponto 100 cm, coincidente com transição da camada de lama consolidada para fluida. Considerando valores médios, este registro cai de 1.568 para 1.532 m/s. Em seguida, o perfil tende a subir gradualmente, atingindo novamente o valor de 1.568 m/s, no ponto 150 cm. Uma nova queda na Vp é notada na seção posterior, seguida de uma suave elevação, até atingir a base do testemunho com o valor de 1.568 m/s.

No testemunho 7 (Fig. 34), quedas nos valores da velocidade também são observadas nas linhas 1 e 2, associadas às interfaces das diferentes camadas. A primeira ocorre na transição de lama consolidada para fluida, no ponto 75 cm, quando, em termos de valores médios, a velocidade cai de 1.550 para 1.537 m/s. Em seguida, é observada uma elevação da Vp no ponto 130 cm, sucedida por uma queda, também para o valor de 1.537 m/s, no ponto 150 cm. Uma nova elevação tem início no ponto 160 cm, atingindo o valor máximo de 1.575 m/s no ponto 180 cm e caindo em seguida para 1.540 m/s, na base do testemunho.

O registro da atenuação em ambas as linhas dos testemunhos 5 (Fig 33) e 7 (Fig. 35) é bastante irregular. No testemunho 5, os maiores valores são observados na linha 1, entre os pontos 40 e 100 cm. Neste trecho existem picos sucessivos de 900 dB/m, todos em relação à freqüência de 1,6 MHz. A partir do ponto 100 cm, a atenuação cai para cerca de 400 a 500 dB/m, e se mantém nesta faixa até o ponto 150 cm, onde novamente se eleva e atinge 900 dB/m. Após este ponto, os valores caem e permanecem na faixa de 500 a 600 dB/m, com

uma pequena elevação para 700 dB/m na base do testemunho. Na linha 2, o comportamento da atenuação é semelhante à linha 1. Pode-se notar que no trecho entre os pontos 20 e 80 cm, para a faixa de freqüência de 1,4 a 1,6 MHz, os valores estão próximos a 900 dB/m, com um pico de 1.000 dB/m no ponto 40 cm. Entre os pontos 80 e 190 cm, os valores caem para uma faixa de 500 a 600 dB/m, com duas exceções pontuais, uma em 100 cm (700 dB/m) e outra no final em 190 cm (900 dB/m).

No testemunho 7 (fig. 35), os maiores valores de atenuação são notados na linha 2, entre o topo e o ponto 80 cm. Neste trecho o valor médio medido é de 900 dB/m, para a freqüência de 1,6 MHz. Alguns pontos isolados chegam a atingir 1.000 dB/m. Do ponto 80 até o ponto 170 cm, os valores são relativamente mais baixos, estando na faixa de 500 a 600 dB/m. Após 170 cm, uma nova elevação na atenuação é observada, também para 1,6 MHz, onde os valores atingem 1.000 dB/m. A atenuação se mantém elevada até chegar ao final do testemunho, nas proximidades do ponto 200 cm, onde cai para cerca de 500 dB/m. A linha 1 mostra um comportamento distinto da linha 2, uma vez que se observam apenas dois pontos de valores elevados: um no topo, próximo a 60 cm (1.100 dB/m) e outro na base, ponto 180 cm (800 dB/m). Os demais trechos registraram valores na faixa de 500 e 600 dB/m.

Resumindo, considerando valores aproximados e os resultados das linhas 1 e 2 do testemunho 5 e da linha 2 do testemunho 7, pode-se afirmar que as medições em lamas consolidadas indicam valores de atenuação de 900 dB/m para a faixa de freqüência de 1,4 a 1,6 MHz. As lamas fluidas indicam, para a mesma faixa de freqüência, valores de 550 dB/m.

TESTEMUNHO 5 – PROPRIEDADES GEOACÚSTICAS (VELOCIDADE)

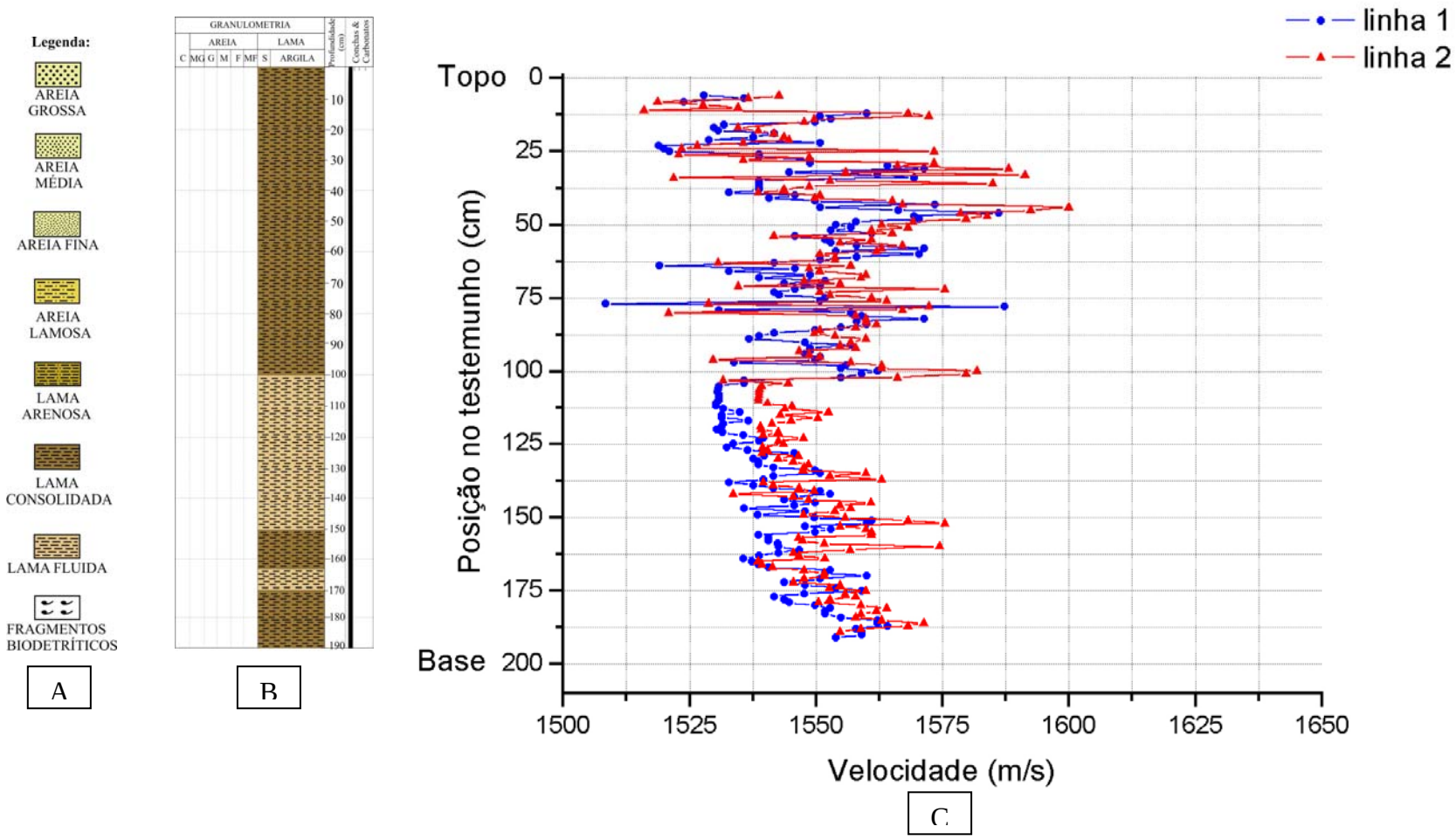


Figura 32 – Testemunho 5. A) Legenda. B) Desenho esquemático da litologia do testemunho. C) Perfis de velocidade do som medidos em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

ATENUAÇÃO

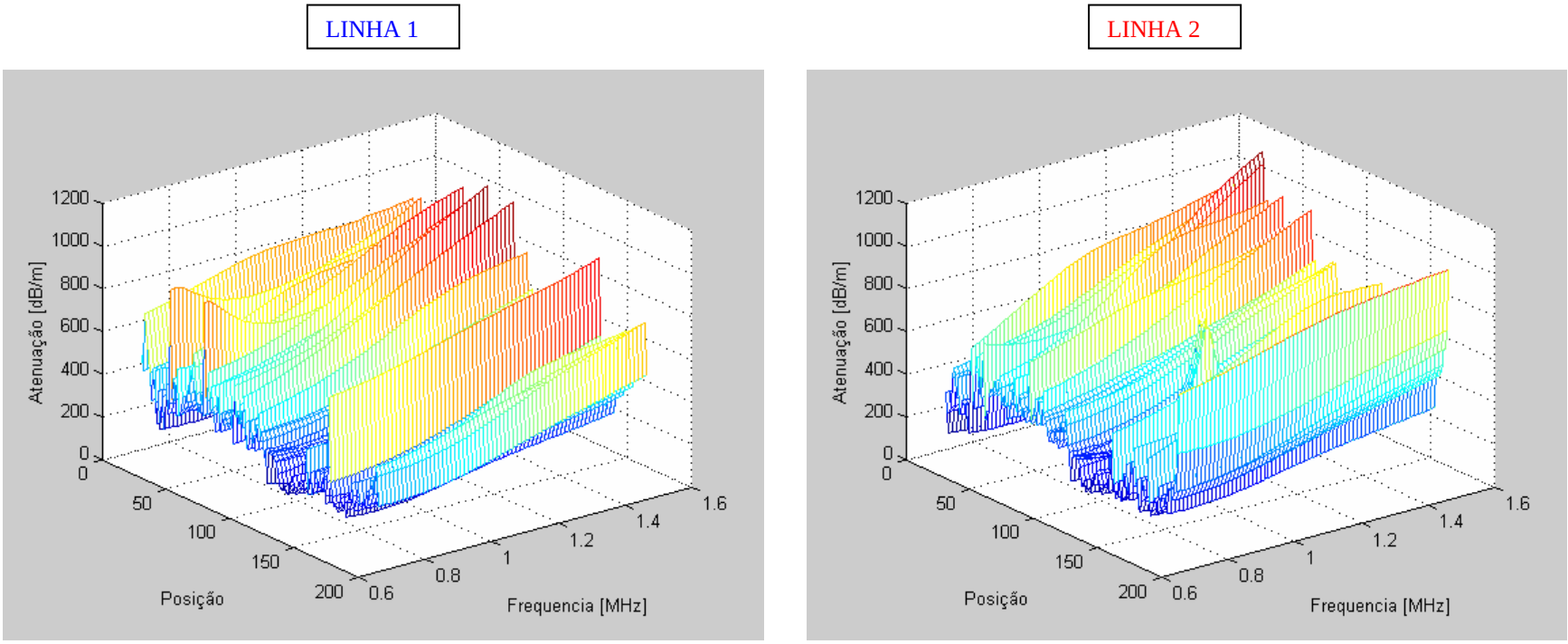


Figura 33 – Testemunho 5. Diagramas de atenuação representativos de medidas realizadas em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

TESTEMUNHO 7 – PROPRIEDADES GEOACÚSTICAS (VELOCIDADE)

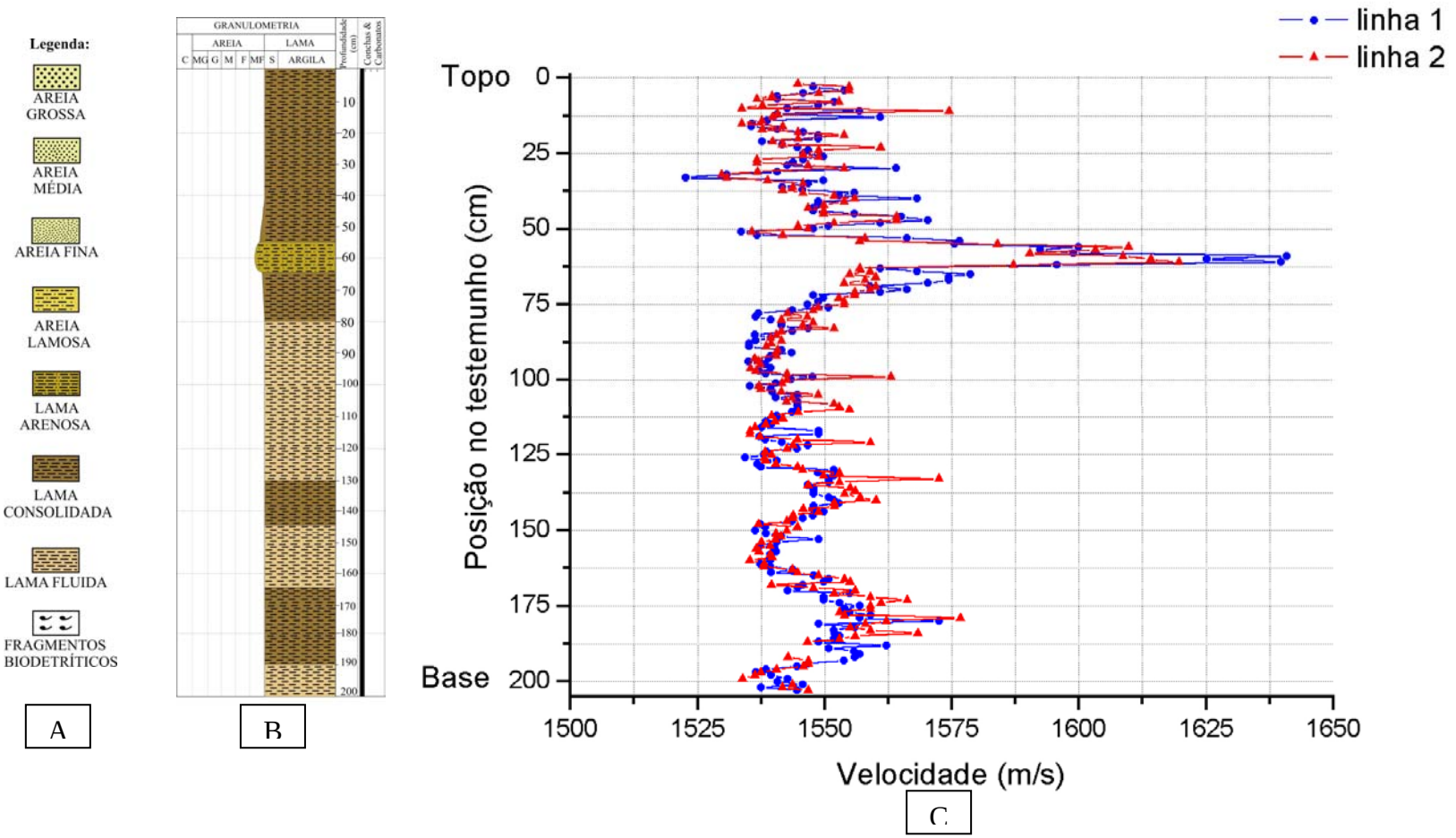


Figura 34 – Testemunho 7. A) Legenda. B) Desenho esquemático da litologia do testemunho. C) Perfis de velocidade do som medidos em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

ATENUAÇÃO

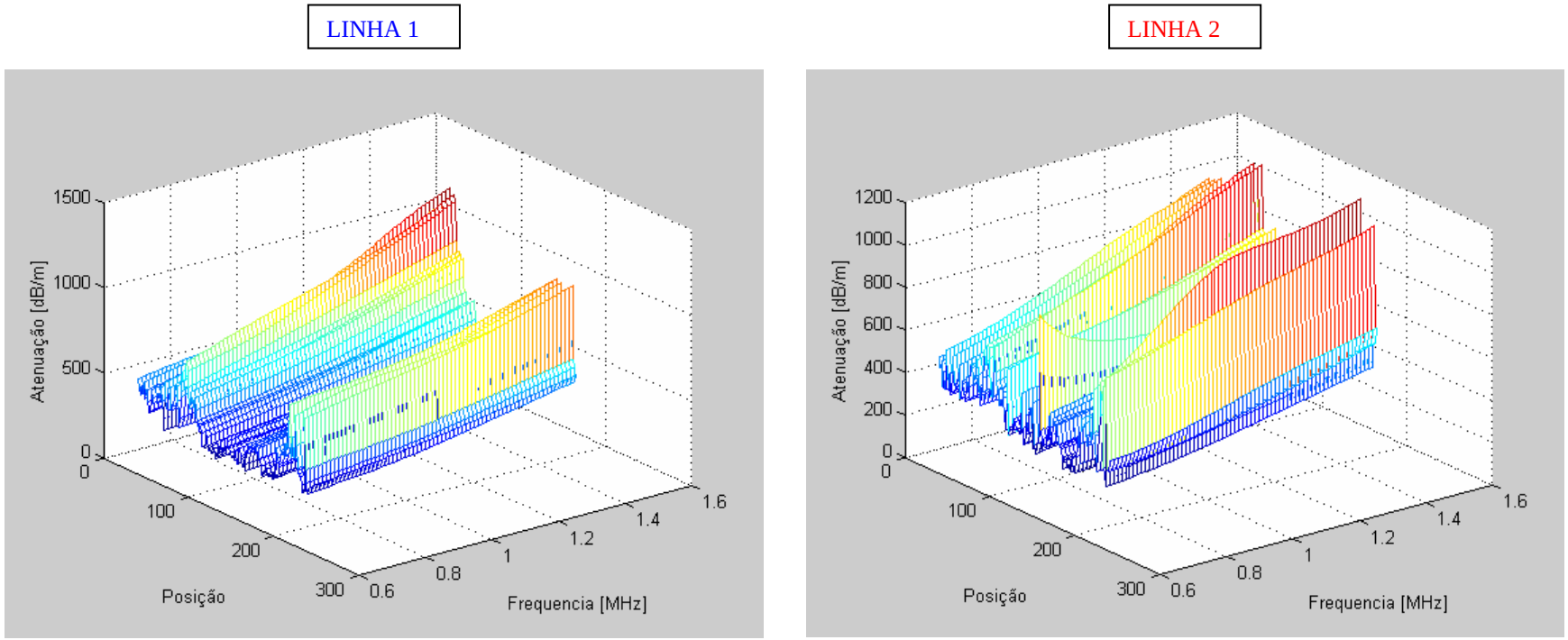


Figura 35 – Testemunho 7. Diagramas de atenuação representativos de medidas realizadas em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

Os resultados obtidos com as medições de ultra-som nos testemunhos 6 (Figs. 36 e 37) e 8 (Figs. 38 e 39), apresentam-se bastante limitados. Estes testemunhos têm em sua composição grande quantidade de cascalho e fragmentos conchas que atenuam totalmente o sinal, não permitindo que o mesmo alcance o transdutor “RC”. Apenas nos primeiros 12 cm destes testemunhos, algum sinal foi obtido.

Para o testemunho 6 (Fig. 36), a Vp varia entre 1.553 e 1.592 m/s, correspondendo à lama arenosa.

No testemunho 8 (Fig. 38), a Vp varia entre 1.554 e 1.625 m/s, correspondendo à areia lamosa.

No que diz respeito à atenuação, na linha 1 do testemunho 6 (Fig. 37), o gráfico é regular e linear, desconsiderando o pico isolado no ponto 5 cm. Os valores, para a freqüência de 1,6 MHz, estão próximos a 1.200 dB/m. No ponto 5 cm a atenuação atinge 1.500 dB/m. Na linha 2, o gráfico é irregular, mas apresenta uma certa linearidade. Os valores variam de 1.200 a 1.300 dB/m, sendo que nos últimos pontos a atenuação chega a 1.400 dB/m.

No testemunho 8 (Fig. 39), linha 1, os valores medidos são regulares, com certa linearidade, estando próximos a 1.500 dB/m. Na linha 2, a atenuação tem valores de 1.450 dB/m no trecho compreendido entre o topo e o ponto 5 cm. No seguimento seguinte, os valores que variam de 1.500 a 1.700 dB/m.

Apesar dos poucos sinais medidos, pode-se afirmar que a lama arenosa coletada no testemunho 6 está associada a uma atenuação de, aproximadamente, 1.200 dB/m. A areia lamosa do testemunho 8 mediu valores na faixa de 1.450 a 1.700 dB/m.

TESTEMUNHO 6 – PROPRIEDADES GEOACÚSTICAS (VELOCIDADE)

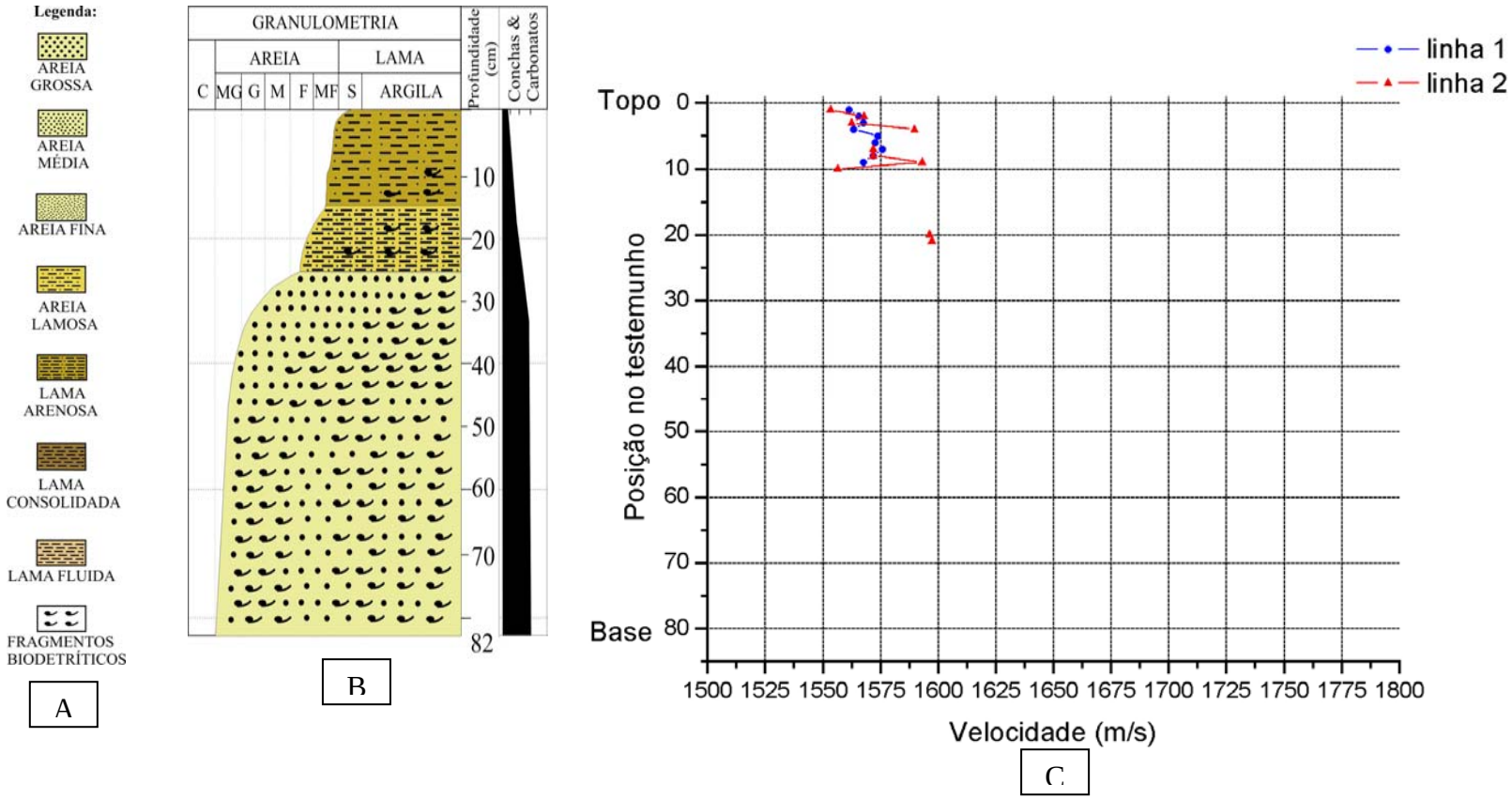


Figura 36 – Testemunho 6. A) Legenda. B) Desenho esquemático da litologia do testemunho. C) Perfis de velocidade do som medidos em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

ATENUAÇÃO

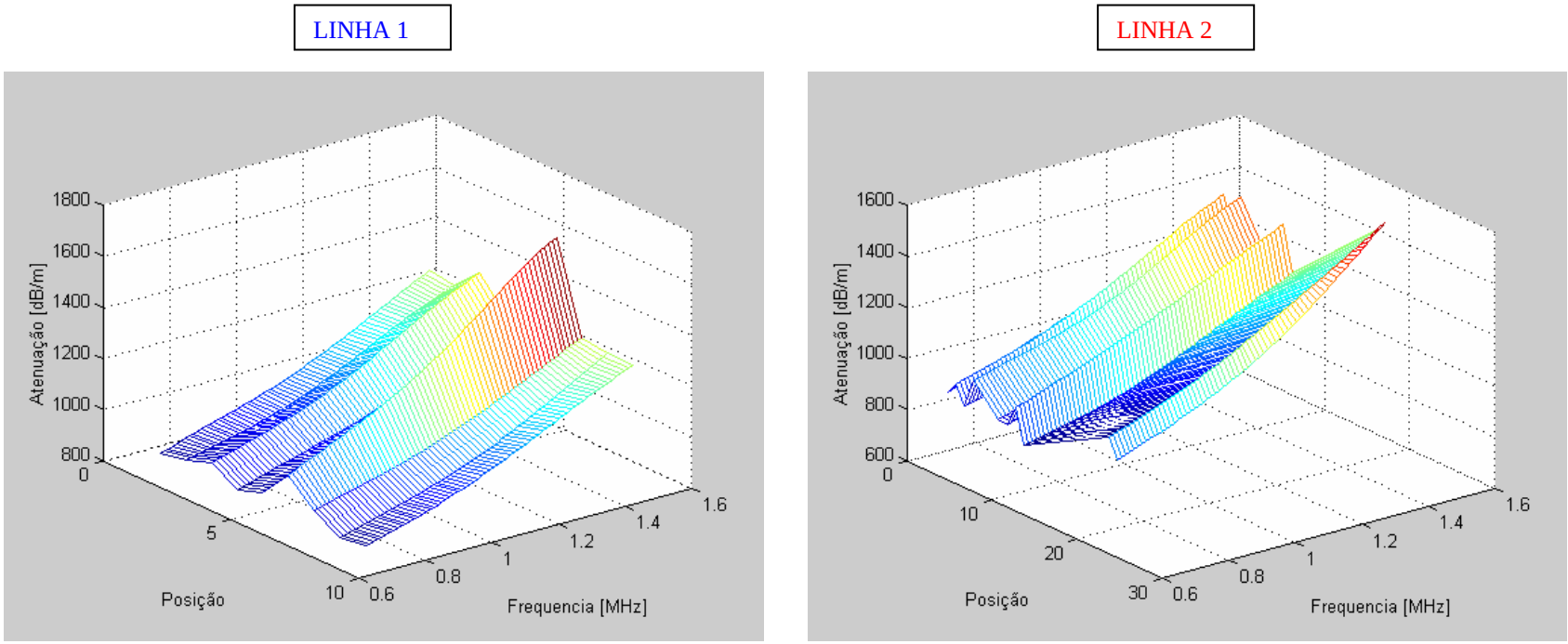


Figura 37 – Testemunho 6. Diagramas de atenuação representativos de medidas realizadas em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

TESTEMUNHO 8 – PROPRIEDADES GEOACÚSTICAS (VELOCIDADE)

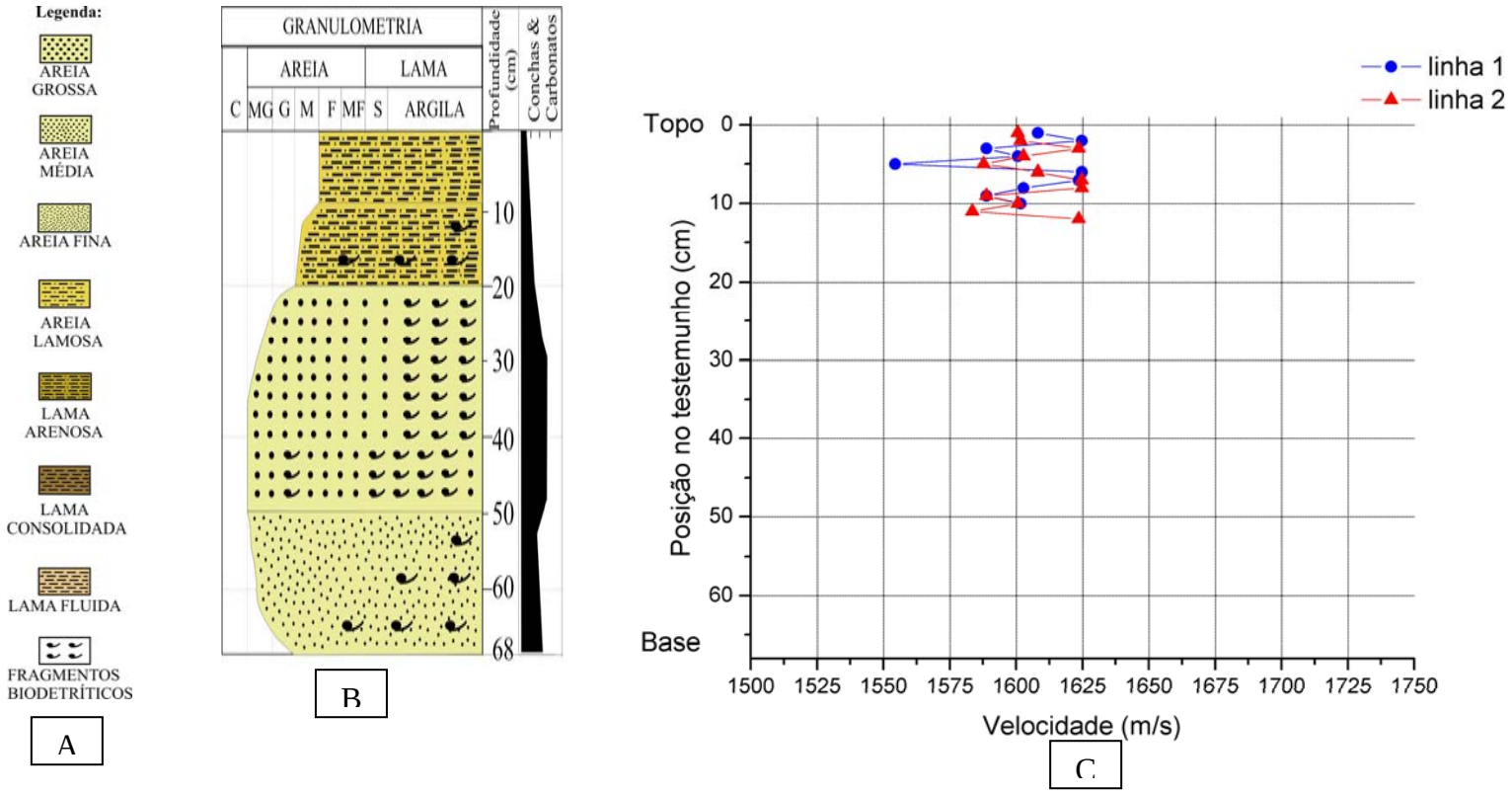


Figura 38 – Testemunho 8. A) Legenda. B) Desenho esquemático da litologia do testemunho. C) Perfis de velocidade do som medidos em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

ATENUAÇÃO

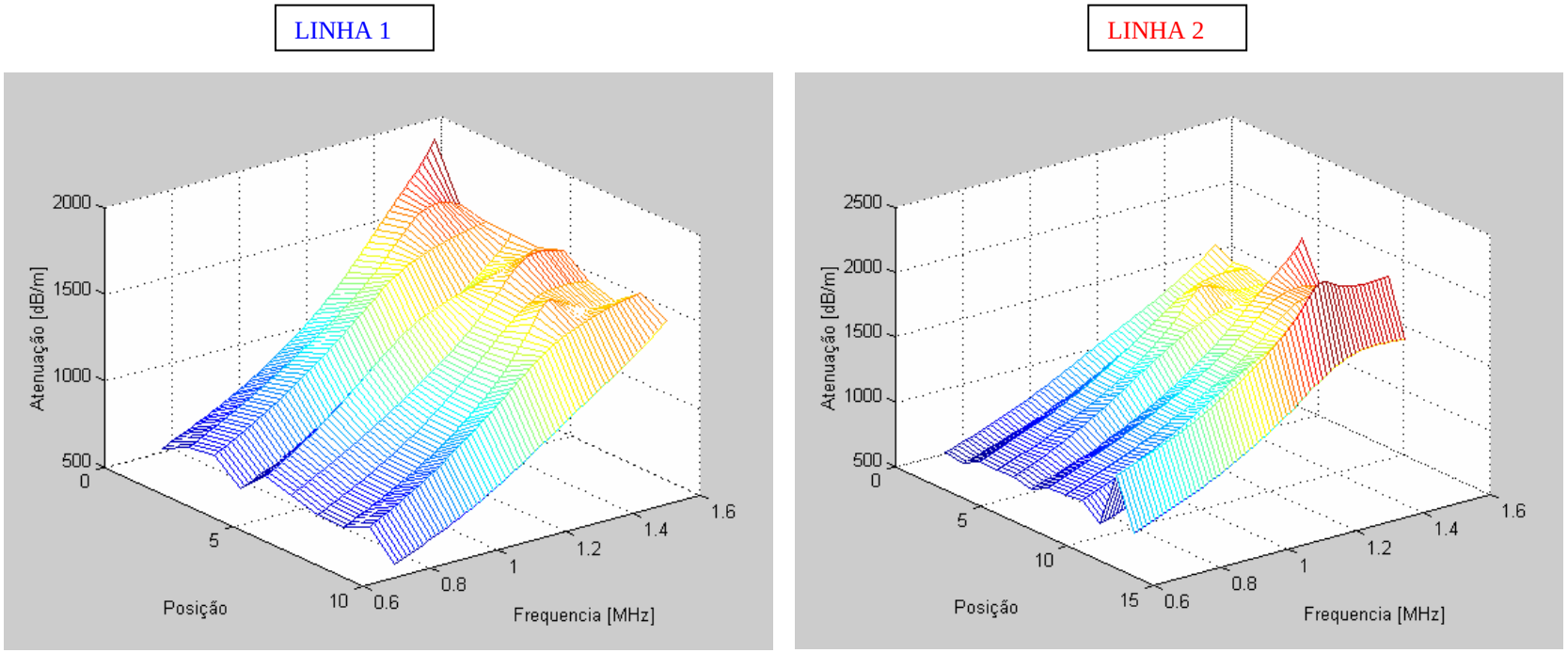


Figura 39 – Testemunho 8. Diagramas de atenuação representativos de medidas realizadas em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

O testemunho 9 (Fig. 40) tem em sua composição duas seções distintas, a primeira composta por lama, onde há uma baixa concentração de fragmentos biodetríticos, e outra seção com lama arenosa, com alta concentração de biodetríticos. Esta distinção provoca alterações na propagação sonora. No primeiro trecho, até o ponto 50 cm, o perfil é mais uniforme com uma faixa mais estreita para a variação da velocidade. Neste trecho os valores estão entre 1.498 e 1.534 m/s. No trecho seguinte, entre 50 cm e a base do testemunho, o perfil perde a continuidade e passa a registrar valores isolados, bem como uma faixa mais ampla para a variação da velocidade. Os valores medidos estão entre 1.492 e 1.565 m/s. Vários são os trechos onde não houve recepção do sinal. Este resultado pode ser explicado pela atenuação provocada pelos fragmentos de conchas imersos na lama.

Com relação à atenuação (Fig. 41), tanto para a linha 1, quanto para a 2, o comportamento do gráfico é irregular e não linear. De qualquer maneira, pode-se notar que no trecho entre o topo e o ponto 50 cm, os valores de atenuação são mais baixos que na seção seguinte, considerando a faixa de freqüência de 1,2 a 1,6 MHz. As medições até 50 cm indicaram valores entre 1.000 e 1.200 dB/m. Após o ponto 50 cm a atenuação aumenta para a faixa de 1.400 a 1.600 dB/m. Na linha 2, na base do testemunho, é registrado um pico de 2.000 dB/m.

Resumindo, considerando valores médios, pode-se dizer que a lama atenuou cerca de 1.100 dB/m , para 1,6 MHz, enquanto que a lama arenosa atenuou 1.500 dB/m, para a mesma freqüência.

TESTEMUNHO 9 – PROPRIEDADES GEOACÚSTICAS (VELOCIDADE)

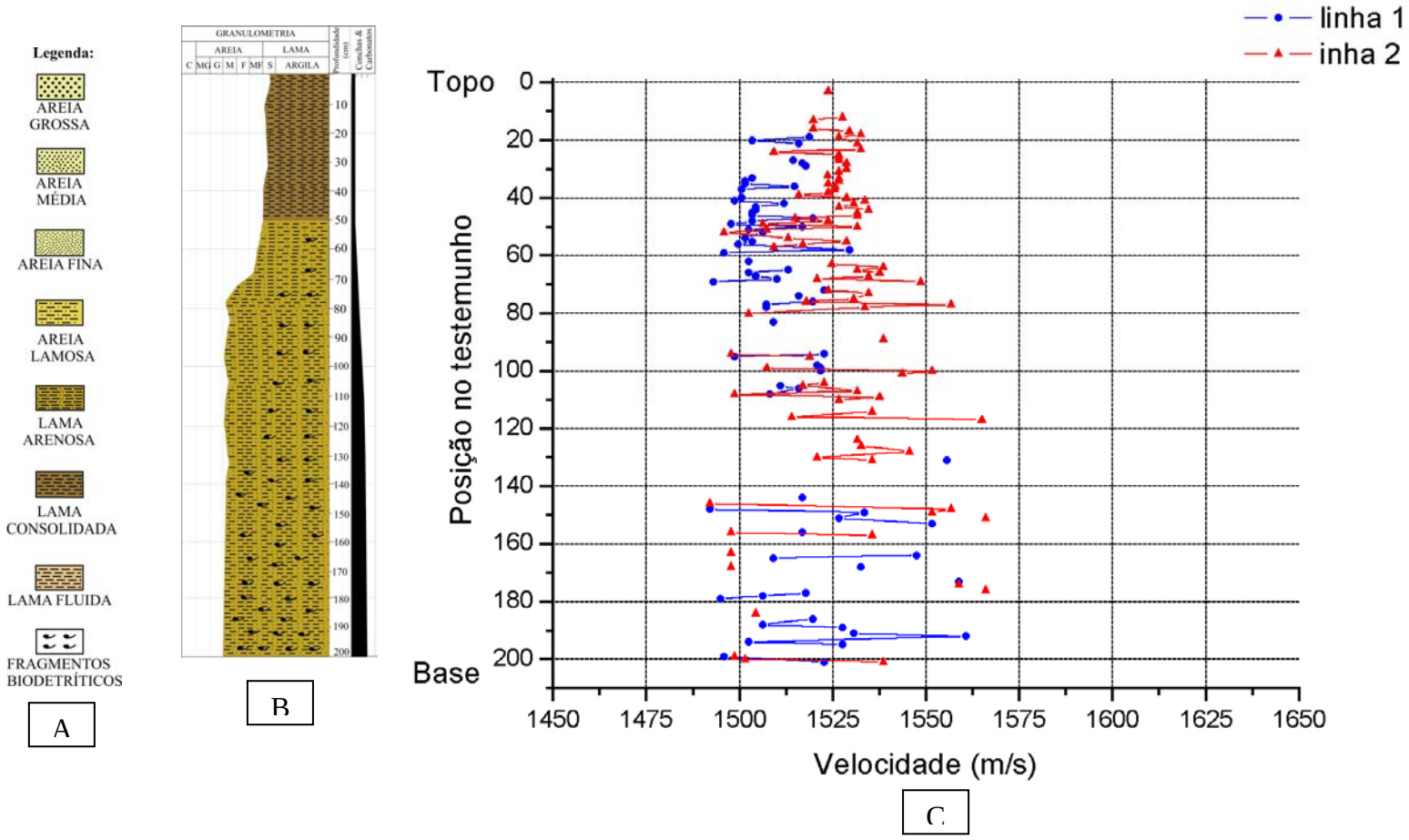


Figura 40 – Testemunho 9. A) Legenda. B) Desenho esquemático da litologia do testemunho. C)– Perfis de velocidade do som medidos em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

ATENUAÇÃO

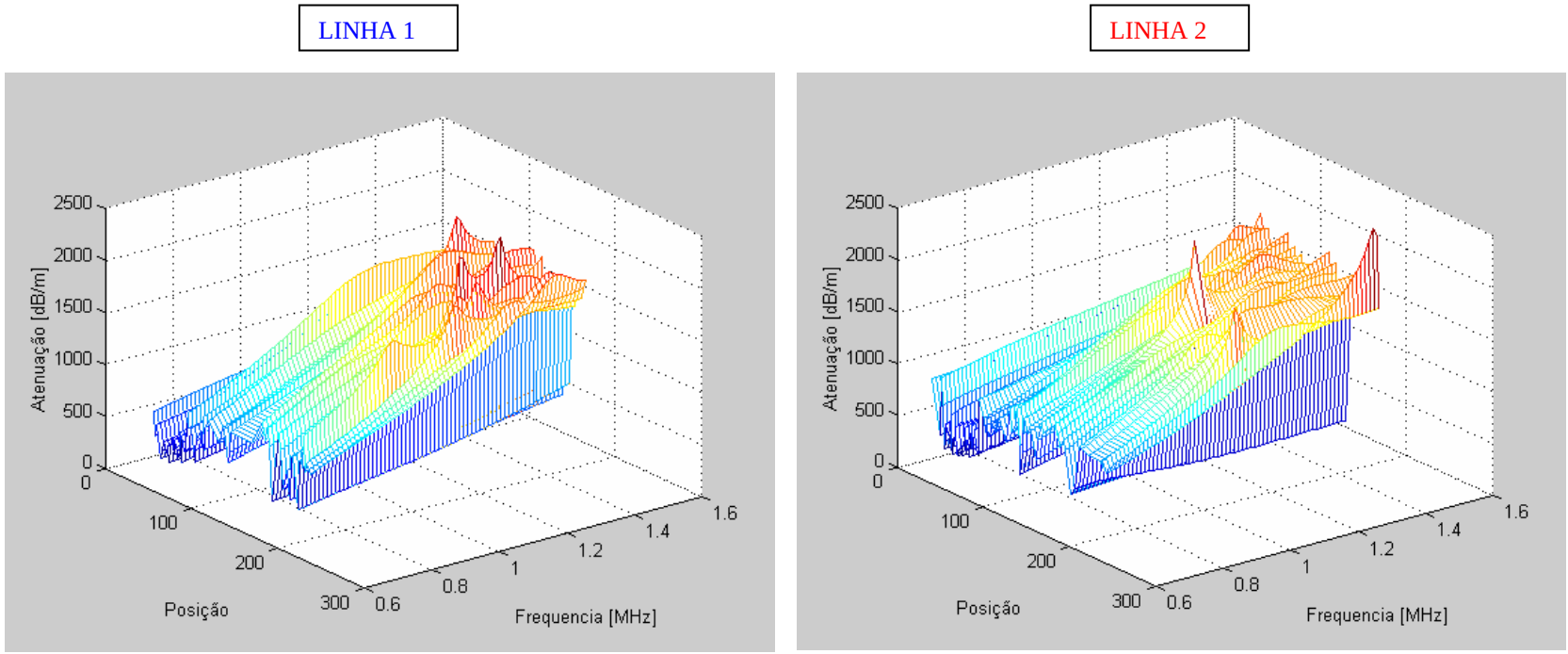


Figura 41 – Testemunho 1. Diagramas de atenuação representativos de medidas realizadas em planos ortogonais (linhas 1 e 2) ao longo do testemunho.

Para cada tipo de sedimento dos testemunhos, foi estabelecida uma faixa de valores medidos para as “Vp” e para a atenuação. A tabela IV relaciona as medidas de velocidade e o gráfico (Fig.42) apresenta um resumo comparativo da faixa de valores observados.

Tabela IV – Faixa de valores de velocidade para cada tipo de sedimento

Tipo de sedimento	Velocidade (m/s) valor mínimo	Velocidade (m/s) valor máximo
Areia grossa	(*)	(*)
Areia média	1.555	1.752
Areia fina	1.635	1.715
Areia lamosa	1.550	1.644
Lama arenosa	1.492	1.639
Lama consolidada	1.493	1.600
Lama fluida	1.530	1.563

(*) Para as areias grossas não houve sinal recebido no transdutor. Toda a intensidade do pulso de ultra-som foi atenuada pelo meio

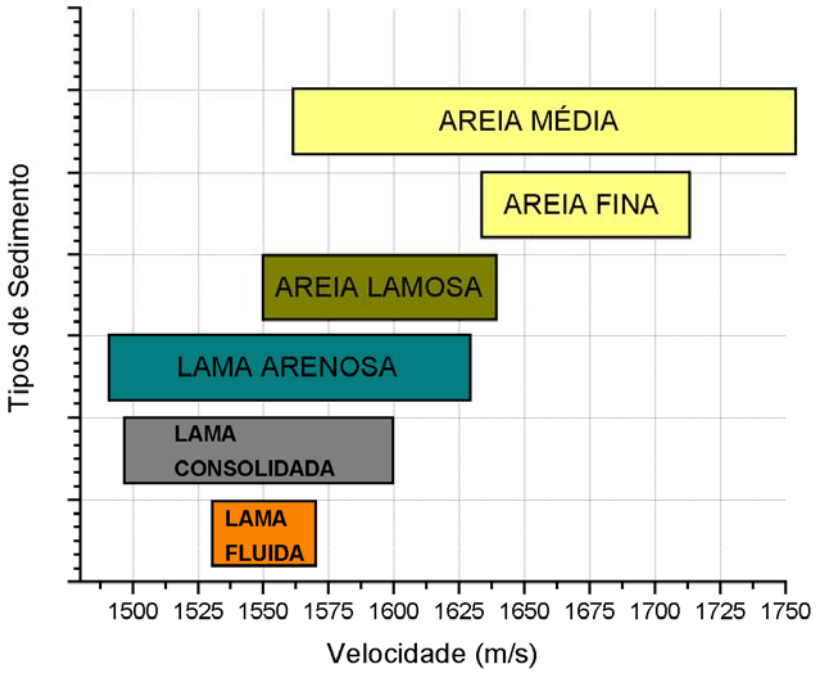


Figura 42 - Faixa de valores de velocidade para as medições nos sedimentos

A tabela V mostra os valores de atenuação aproximados, para a freqüência de 1,6 MHz, entretanto, cabe ressaltar que as medidas obtidas não são absolutas. Os valores apresentados significam apenas uma tendência desta propriedade física para a situação específica na qual foi realizada a medição. Pequenas variações na freqüência e, até mesmo na posição dos transdutores, são suficientes para alterar medidas de atenuação em meios viscoelásticos. O gráfico (Fig. 43) apresenta um resumo comparativo da faixa de valores observados.

Tabela V – Faixa de valores de atenuação para a freqüência de 1,6 MHz

Tipo de sedimento	Atenuação (dB/m) valor mínimo	Atenuação (dB/m) valor máximo
Areia média	1.100	1.300
Areia fina	400	700
Areia lamosa	1.250	1.750
Lama arenosa	1.150	1.550
Lama consolidada	850	1.150
Lama fluida	500	600

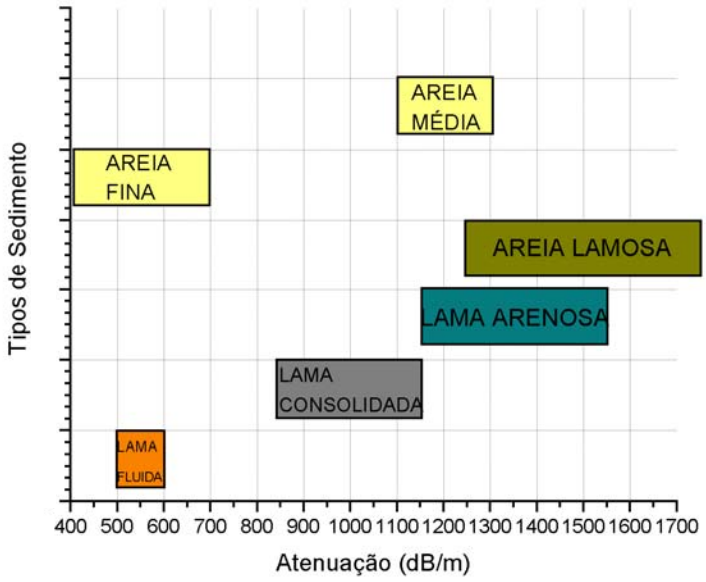


Figura 43 - Faixa de valores observados para atenuação, em função da freqüência de 1,6 MHz

A análise das relações entre os valores encontrados e as características dos sedimentos marinhos é discutida no próximo capítulo.

8 – DISCUSSÃO

Após a exposição dos resultados obtidos nas medições de propagação da onda compressional nos sedimentos coletados, este capítulo apresenta uma análise da relação entre os valores de velocidade e atenuação dos sinais e as características sedimentológicas do material que compõe os testemunhos. Os principais aspectos abordados são:

- razões para a não recepção do sinal em algumas seções dos testemunhos;
- comportamento dos sinais de “US” ao longo dos perfis de “Vp” e a comparação destes resultados com os disponíveis na literatura;
- análise dos resultados de atenuação, em função da freqüência, e em relação aos tipos de sedimento;
- identificação das interfaces entre camadas de sedimentos; e
- relações observadas entre as velocidades e a atenuação dos sinais de onda (P).

8.1 – Seções onde não houve recepção do sinal

No grupo de nove (9) testemunhos, diversas foram as seções onde não foi detectado o sinal da onda de “US” no transdutor receptor.

Nos testemunhos compostos por areias médias (1 e 3), as medições nos primeiros centímetros apresentaram-se intermitentes, deixando de haver recepção em alguns pontos. O sinal foi totalmente perdido à medida que se aproximou da base, em uma posição coincidente com o aumento da concentração de conchas e seus fragmentos (Figs. 24 e 26).

Este fenômeno também foi observado em algumas seções do testemunho 4, sendo que, após o ponto de 49 cm, o sinal foi totalmente perdido (Fig. 30).

As medições de “US” observadas nos testemunhos 6 e 8 foram muito prejudicadas. Estes testemunhos têm em sua composição areia grossa, grande quantidade de cascalho, conchas e fragmentos biodetríticos que atenuaram totalmente o sinal (Figs. 36 e 38).

No testemunho 9, na seção após o ponto de 50 cm, exatamente onde começam a aparecer os fragmentos de conchas, o sinal perde a continuidade e passa a registrar valores isolados. Vários são os trechos onde não houve recepção do sinal (Fig. 40).

Neste presente estudo, a freqüência nominal utilizada foi de 2,25 MHz, o que implica em um comprimento de onda (λ) de aproximadamente 0,711 mm. Logo, as partículas com dimensões próximas ou maiores que este “λ” são superfícies “espalhadoras” em potencial.

Portanto, dimensões de grãos iguais ou superiores a areia grossa (0,5 mm), principalmente aquelas que têm o formato de pequenos planos (conchas e fragmentos), provocam uma intensa atenuação no sinal por espalhamento (*scattering*).

Segundo Richardson e Briggs (1996) e Maa *et al*. (1997), em sedimentos grossos a razão de dissipação de energia acústica é alta, e a velocidade da onda também é alta. Quando os valores que representam a granulometria do material são próximos do valor do comprimento de onda (λ), a perda de energia acústica causada pelo espalhamento passa a ser importante.

Gorgas *et al*. (2002) menciona que materiais heterogêneos, como sedimentos marinhos, provocam uma maior atenuação devido ao espalhamento, e que grãos interferem de modo significativo nas altas freqüências, tendo em vista a relação entre o comprimento de onda e a dimensão dos grãos.

De acordo com Buckingham (2005), nas medições de atenuação devem ser consideradas as perdas de energia relativa ao calor, oriunda do atrito entre as partículas, e aquelas perdas relacionadas ao espalhamento (*scattering*), que ocorrem em meios com grande heterogeneidade granular. Sendo este último fator associado à existência de fragmentos de conchas.

A atenuação total de um sinal, ou mesmo a redução nos valores da velocidade de propagação, também podem estar associadas à presença de gás no sedimento. Para Grossmann (2002), a presença de gás em sedimentos marinhos provoca um espalhamento generalizado na frente de onda (*scattering*) e uma grande atenuação da amplitude do sinal (energia), resultando em trechos de testemunhos sem registro.

Figueiredo *et al*. (1996), analisando registros sísmicos da foz do rio Amazonas, citam que a existência de bolhas de gás trapeadas em camadas de sedimento, produzidas pela degradação bioquímica da matéria orgânica, espalham e atenuam os sinais sonoros, causando mascaramento acústico e perda do sinal.

Os gases típicos encontrados em sedimentos marinhos incluem hidrogênio, dióxido de carbono, nitrogênio, amônia, sulfídrico, metano e outros hidrocarbonetos. Estes gases podem ser originados pela atividade bacteriana em sedimentos rasos (processo biogênico), ou por processos termogênicos ocorrendo em maiores profundidades (Floodgate e Judd, 1992). Entretanto, dentre estes gases, o único que pode ser encontrado em considerável quantidade nos sedimentos marinhos é o gás metano (Davis, 1992; Floodgate e Judd, 1992).

O principal problema para medições em laboratório, de sedimentos saturados por água, é a presença de ar trapeado nos espaços porosos. O que também ocorre para amostras construídas artificialmente. Quando as amostras são compostas por sedimentos naturais, uma atenuação mais intensa do sinal pode ocorrer devido à existência de ar ou gás, originado da decomposição de material orgânico (Meyer, 1957; Hamilton, 1972).

Fischer (1996) menciona problemas de não propagação e não medição de “Vp” em testes realizados em testemunhos coletados no litoral norte do Brasil, devido à presença de gás metano.

Considerando que os testemunhos utilizados nesta dissertação foram coletados e mantidos em temperatura ambiente durante um período de 30 a 50 dias, até a execução das medidas de ultra-som, é certo que houve fermentação bacteriana com geração de gases.

Outro fenômeno que pode provocar a perda do sinal é a ausência de água na amostra, ou seja, a desidratação do sedimento. A perda da água que compõe o sedimento implica na entrada de ar, na formação de espaços vazios (vácuo) ou na formação de bolhas em seu conteúdo. Estas estruturas atenuam o sinal por espalhamento, impedindo a propagação da onda acústica.

A desidratação pode justificar a ausência de sinal na extremidade de alguns testemunhos, onde a tampa de vedação pode ter deixado vazar água do sedimento. Como exemplo, observa-se o topo dos testemunhos 1 e 3.

8.2 – Análise dos Perfis de “Vp”

Os fatores geológicos mais relevantes que controlam a velocidade de onda (P) em sedimentos marinhos são a porosidade, a densidade e a pressão de confinamento. Em geral, existe uma tendência de aumento da “*Vp*”, com a diminuição da porosidade e um aumento da densidade (Ayres Neto, 1998).

No gráfico de velocidades (Fig. 42), as areias (média, fina e areia lamosa) apresentaram velocidades mais altas, quando comparadas com os sedimentos lamosos. Nas areias médias foram medidos os maiores valores de “Vp” (1.752 m/s), enquanto que os menores foram registrados na lama arenosa (1.492 m/s) e na lama consolidada (1.498 m/s). A lama fluida apresentou medidas de “Vp” intermediárias, quando comparados às lamas consolidadas e arenosas.

Estes resultados estão de acordo com aqueles obtidos por outros autores. Gorgas *et al*. (2002), em seu experimento, constatou que as maiores velocidades e os maiores valores para densidade foram observados para os sedimentos mais grossos, enquanto que os menores valores estão ligados aos sedimentos mais finos.

Para Buckingham (2005), em sedimentos que variam desde o cascalho até a argila, um aumento da granulometria representa um aumento nos valores da velocidade e da atenuação.

A lama arenosa e a lama compactada apresentaram valores de “Vp” muito semelhantes, e dentro da mesma faixa de variação, o que indica que, em termos de propagação de onda “P”, estes sedimentos têm o mesmo comportamento. É interessante observar que em alguns pontos das amostras, ambos sedimentos tiveram valores medidos abaixo de 1.500 m/s (valor de referência para propagação de “Vp” na água). Este comportamento pode ser justificado pela presença de gás ou bolhas de ar no conteúdo do material, o que necessariamente implicaria em uma redução no valor da “Vp”. Segundo Gorgas *et al*. (2002), experimentos realizados em sedimentos com alto teor de composição orgânica e alta porosidade, mostraram que a “Vp” foi menor que 1.440 m/s e a atenuação foi alta, devido à presença de bolhas de gás metano criadas por micro-organismos. Para Hamilton (1972), quando ar ou gás está presente, as medidas de atenuação tendem a ser mais altas, enquanto que as medidas de velocidade tendem a ser mais baixas, valores estes proporcionais e dependentes da freqüência e da dimensão das bolhas.

Fischer (1996) relata medidas de “Vp” em testemunhos coletados na plataforma continental e talude norte do Brasil. Este autor registrou valores de 1.465 a 1.495 m/s em sedimentos finos (argilas), com bolhas de ar em diversos trechos.

Com relação à faixa de variação entre a velocidade mínima e máxima medida para cada tipo de sedimento, foi observado que as areias médias, a areia lamosa, a lama arenosa e a lama consolidada, apresentaram uma faixa ampla, enquanto que as areias finas e a lama fluida, mostraram uma faixa mais estreita. Este comportamento pode estar associado aos efeitos de heterogeneidade do material, uma vez que foram considerados os valores nas duas linhas de medição (planos ortogonais 1 e 2) de cada testemunho. Logo, o sedimento mais homogêneo (areia fina e lama), estaria menos susceptível a alterações na propagação. Esta heterogeneidade pode ocorrer devido à geometria das camadas de sedimento, ao grau de seleção das partículas, como também devido à própria proporcionalidade das misturas dos grãos. Nos histogramas da análise granulométrica, apresentada no apêndice III, podemos observar que existem variações significativas de concentrações de sedimentos de grãos

distintos em uma mesma amostra, realidade esta que não é contemplada pela classificação de Shepard (1954), uma vez que este método considera uma margem de 25% para distinguir os tipos de sedimentos.

Outro fator a ser considerado é o fato de a dimensão do grão da areia ser próximo ao valor do comprimento de onda do pulso, o que provoca uma maior dispersão do feixe de "US" e, conseqüentemente, uma maior variação nas velocidades. No entanto, esta última hipótese não justifica a variação significativa medida na lama consolidada que, devido a sua característica granulométrica, deveria apresentar uma faixa estreita de valores de velocidade.

A tabela VI mostra um resumo dos resultados obtidos por outros autores em medições de velocidade de onda compressional em diversos tipos de sedimento, coletados por testemunhadores, em ambiente de plataforma continental. Apesar de os métodos e as condições de medição serem distintos dos utilizados nesta dissertação, pretende-se apresentar neste resumo uma comparação dos valores de "Vp", já tabelados na literatura, com os valores medidos neste trabalho.

Pode-se observar que a maioria dos valores indicados nesta tabela está dentro da faixa estabelecida nesta pesquisa (Fig. 42). Valores observados fora desta faixa são assinalados na tabela com (*).

Maa *et al*. (1997) mediram valores de "Vp", para sedimentos com alta concentração de finos (siltes e argilas), na faixa de 1.430 m/s a 1.590 m/s, utilizando freqüências de 1 e 2,25 MHz. Estes valores também são coincidentes com as medições apresentadas nesta dissertação.

Richardson e Briggs (2004) analisaram dados oriundos de 4.500 medidas de propriedades e parâmetros geoacústicos de sedimentos marinhos, dentre elas velocidade e atenuação de onda compressional. Estas medições foram realizadas em testemunhos de sondagem coletados em 67 posições, em locais de águas rasas. O método utilizado foi baseado na medição do tempo de propagação e na amplitude de sinais transmitidos através dos tubos dos testemunhos, na freqüência de 400 kHz. A tabela VI, no campo representativo destes autores, apresenta os maiores e os menores valores da velocidade, para cada tipo de sedimento.

Para unificar as interpretações dos tipos de sedimentos citados na tabela VI, uma vez que outros autores utilizaram denominações distintas, as areias muito finas foram incluídas no grupo das areias finas; as areias siltosas no grupo das areias lamosas; os siltes arenosos no grupo das lamas arenosas e os siltes e argilas foram incluídos no grupo das lamas.

Tabela VI - Medidas de laboratório de velocidade de onda compressional (Vp) em sedimentos marinhos. Valores apresentados em “m/s”, medidos ou corrigidos para a temperatura de 23˚ C.

Tipo de sedimento	Shumway (1960)		McLeroy and DeLoach (1968)		Hamilton (1980)		Richardson e Briggs (2004)		Valores obtidos nesta dissertação	
							mínimo	máximo	mínimo	máximo
Areia grossa	-		-		1.836				-	-
Areia média	1.737		1.815 (*)		-		1.735,0	1.774,1 (*)	1.555	1.752
Areia fina	1.693		-		mínimo	máximo	1.651,9	1.764,2 (*)	1.635	1.715
					1.702	1.749 (*)				
Areias lamosas	1.551		1.540 (*)		1.646		1.511,4 (*)	1.617,6	1.550	1.644
Lama arenosa	1.541		-		mínimo	máximo	1.609,7	1.652,4 (*)	1.492	1.639
					1.579	1.652 (*)				
Lama	mínimo	máximo	mínimo	máximo	1.520	1.615 (*)	1.480,4 (*)	1.554,6	1.493	1.600
	1.495	1.548	1.525	1.530						

(*) Valores que estão fora da faixa obtida para as medições nesta dissertação (Tabela IV)

8.3 – Análise dos Resultados de Atenuação

Medidas de atenuação em meios viscoelásticos, conforme mencionado no capítulo 7 desta dissertação, naturalmente, são difíceis de se obter, tendo em vista a variação desta propriedade em função da freqüência e sua susceptibilidade a ruídos e a anisotropia.

Hamilton (1980) menciona que para todos os tipos de sedimentos não foram encontrados registros de medidas em freqüências superiores a 1 MHz.

Portanto, o propósito deste trabalho é relacionar os resultados obtidos nas medições com o tipo de sedimento, apresentando valores relativos de atenuação, associando as diferenças encontradas às características do sedimento.

Com o resumo apresentado no gráfico de atenuação, em função da freqüência de 1,6 MHz (Fig. 43), foi possível observar que os maiores valores de atenuação, bem como as maiores faixas de variação, foram encontrados nas areias lamosas e nas lamas arenosas. As areias médias apresentaram uma atenuação menor que as misturas lamosas e maior que a lama consolidada. As areias finas e a lama fluida registraram os menores valores de atenuação.

De um modo geral, os resultados obtidos para as misturas lamosas, areia fina e lama fluida, estão de acordo com a literatura. Esta explica que os maiores valores de atenuação estão associados aos sedimentos de menor granulometria e que misturas com alto teor de água (lama fluida), indicam valores baixos de atenuação. Especificamente, os resultados com as areias médias e com a lama consolidada estão em desacordo com essa teoria.

Para Hamilton (1972), a granulometria e a porosidade são os parâmetros sedimentológicos que mais influenciam a atenuação e o módulo de rigidez. Em areias grossas, os grãos são maiores e mais arredondados, a área de contato entre as partículas é menor. Conseqüentemente, a rigidez é relativamente mais baixa em sedimentos grossos quando comparados a finos. Quando os grãos são submetidos a algum tipo de pressão e a um movimento, existe um menor número de contatos entre as partículas. Logo, o efeito da atenuação devido à fricção é menor. À medida que a dimensão dos grãos diminui, a quantidade de partículas por unidade de volume aumenta, aumentando assim as áreas de contato e, conseqüentemente, a rigidez e a atenuação. Sob este aspecto, também se deve considerar a força de coesão, que tem maiores efeitos sobre os siltes e as argilas. Segundo Hamilton (1972), estes resultados são comprovados em experimentos de laboratório e *in situ*, indicando que a atenuação tem seus valores máximos para areias muito finas, siltes, argilas e suas misturas.

Leurer (1997) afirmou que sedimentos de granulometria fina, coesivos, ricos em argila, exibem alta atenuação devido aos mecanismos viscosos de absorção.

Entretanto, com uma teoria contrária à apresentada acima, Gorgas *et al*. (2002) realizou experimentos que registraram valores máximos de atenuação em sedimentos que apresentavam em sua composição uma maior granulometria, associando estes resultados ao efeito elevado da fricção que, combinado a heterogeneidade do material, implicam em um espalhamento da energia da onda.

Complementando as opiniões acima apresentadas, a teoria descrita por Hamilton (1980) e ratificada por Stoll (1980) pode explicar o comportamento da atenuação nas areias médias e na lama consolidada. De acordo com estes autores, para sedimentos finos, o modo de propagação e a velocidade da onda acústica são dominados pelo módulo de compressão das partículas sólidas e do conteúdo líquido que compõe o pacote de sedimentos. A teoria de Biot (1956a,b) mostra que estes módulos podem ter a mesma magnitude, aproximando-se do valor do módulo aplicado ao fluido. Assim, as estruturas das partículas finas e do fluido, quando estimulados por uma onda, se movem quase que em fase, não existindo diferença na velocidade que cause uma dissipação viscosa. Como resultado, a atenuação em sedimentos finos e homogêneos é extremamente baixa. No entanto, à medida que sedimentos mais grossos, como a areia, são incorporados ao pacote de finos, estes fazem com que haja um aumento na granulometria, uma diminuição na porosidade e um aumento da heterogeneidade. Logo, os materiais grossos perturbam e rompem as estruturas das argilas e siltes que compõe os finos. O efeito desta mistura é o aumento da densidade do sedimento, sem que haja um aumento compatível do módulo de elasticidade. Então, à proporção que a quantidade de material grosseiro aumenta, uma estrutura sólida é estabelecida pelo contato físico dessas partículas, aumentando a rigidez e a fricção, e diminuindo a porosidade, o que implica em aumento da atenuação e da velocidade de propagação.

Outro dado relevante a ser citado, é linearidade existente entre a atenuação, em dB/m, e a freqüência, observada na linha 1 do testemunho 1 (Fig. 25), nas linhas 1 e 2 do testemunho 2 (Fig. 29), em alguns trechos das linhas 1 e 2 dos testemunhos 5 e 7 (Figs. 33 e 35) e nas linhas 1 e 2 do testemunho 6 (Fig. 37), o que está de acordo com o preconizado por Hamilton (1971, 1972, 1976, 1980 e 1985), Kibblewhite (1989), Simpson *et al*. (2000 e 2003) e Buckingham (2004 e 2005), conforme já mencionado no item 4.3 desta dissertação.

8.4 – Identificação das Interfaces entre Camadas de Sedimentos

Neste trabalho, camadas distintas de sedimentos foram claramente identificadas por variações ocorridas nos perfis de velocidade da onda “P”.

Maa *et al*. (1997), em seu experimento de medição de propagação de ultra-som em sedimento marinho em laboratório (freqüência de 1 e 2,25 MHz), obteve resultados que indicavam que grãos de sedimentos finos e grossos mostram propriedades diferenciáveis em termos de velocidade e atenuação de onda acústica. O método desenvolvido por este autor detectou, com alta resolução, interfaces entre camadas de sedimento.

No testemunho 2, a fina camada de areia lamosa, inserida em um pacote sedimentar de areias finas, foi identificada pela queda na velocidade (Fig. 28). Na areia fina, a faixa de valores de velocidade está entre 1.635 m/s (mínima) e 1.715 m/s (máxima). No trecho de areia lamosa, o registro sônico mostra uma queda acentuada de valor, atingindo 1.566 m/s. O diagrama de atenuação também registrou uma alteração significativa neste ponto, onde valores de aproximadamente 700 dB/m passam para 1.300 dB/m.

Outra interface foi observada no testemunho 4. Nos primeiros 20 cm, os valores de velocidade estão com certa uniformidade, variando entre 1.503 e 1.547 m/s. A partir do ponto 22 cm, há um salto no valor para 1.600 e 1.626 m/s, permanecendo neste patamar até o ponto 29 cm (Fig. 30). Esta variação no perfil da “Vp” está associada à transição da camada de lama arenosa para areia lamosa.

Nos testemunhos 5 e 7, compostos por lamas fluidas e consolidadas, as principais diferenças nos acamamentos foram registradas com quedas significativas nos valores da velocidade. Uma pequena camada de lama arenosa, localizada no testemunho 7 nas proximidades do ponto 60 cm, pode estar relacionada à súbita elevação da velocidade, que atingiu o valor de 1.639 m/s. Essas transições também podem ser identificadas nos diagramas de atenuação, com as devidas ressalvas para a faixa de freqüência.

O testemunho 9, que tem em sua composição duas seções distintas (Fig. 40), também registrou alterações na propagação sonora. No primeiro trecho, até o ponto 50 cm, o perfil é mais uniforme com a velocidade representada por uma faixa mais estreita. Neste trecho os valores estão entre 1.498 e 1.534 m/s. No trecho seguinte, entre 50 cm e a base do testemunho, o perfil passa a registrar valores isolados, com uma faixa mais ampla para a variação da velocidade, medindo valores entre 1.492 e 1.565 m/s. O diagrama de atenuação, considerando a faixa de freqüência de 1,2 a 1,6 MHz, mostra valores mais baixos no primeiro

trecho (lama), quando comparados ao trecho seguinte, composto por lama arenosa com fragmentos biodetríticos (Fig. 41)

Resumindo, se considerarmos as seções onde os perfis de velocidade foram interrompidos pela não recepção do sinal no transdutor “RC”, conforme citado no item 8.1, e excluindo a passagem da lama para a lama arenosa (testemunho 4) que não foi registrada, pode-se afirmar que as interfaces observadas nos testemunhos coletados foram identificadas nos perfis sônicos, sendo que, em algumas seções (testemunhos 2, 5, 7 e 9), as informações fornecidas pelos diagramas de atenuação confirmam essas transições de camadas.

8.5 - Relações entre as Velocidades e a Atenuação

Apesar de os fenômenos físicos relacionados a estas duas propriedades serem distintos, no experimento desenvolvido nesta pesquisa, foi possível observar que, para alguns sedimentos, há nitidamente um aumento na velocidade relacionado a uma diminuição da atenuação e vice-versa. Este efeito foi observado na calibração do sistema, item 6.2 desta dissertação (Figs. 20 e 21), e nas linhas 1 e 2 dos testemunhos 2, 3, 5, 7 e 9 (Figs. 26, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 40 e 41).

Ayres e Theilen (2001) mencionam que apesar de ser difícil inferir sobre a natureza dos processos que são responsáveis pela atenuação em sedimentos, os resultados obtidos na análise de gráficos de valores de “Qp” (quantificador adimensional representativo da atenuação para ondas P) versus “Vp” e de “Qs” versus “Vs” indicam que ambas “Vp” e “Vs” aumentam com a diminuição de “Qp” e “Qs”. Em outras palavras, estas observações sugerem que quando a atenuação é alta, a velocidade é baixa.

Tabelas produzidas por Richardson e Briggs (2004), com resultados de propriedades e parâmetros geoacústicos oriundos de 4.500 medidas em sedimentos, mostram claramente uma relação proporcional entre os valores de “Vp” e atenuação, onde os maiores valores da velocidade são acompanhados pelos menores valores de atenuação e vice-versa.

9 – CONCLUSÕES

A aparelhagem montada em laboratório mostrou-se adequada para a função de emitir, receber, digitalizar e armazenar sinais de propagação de ondas compressionais (P). A integração dos equipamentos, associada à metodologia adotada e ao programa de processamento de sinais (*ultra_sed.mat*) compõem o que se denomina nesta pesquisa de sistema de medição de velocidade e atenuação de onda sonora (Fig. 6).

Foram coletados nove (9) testemunhos na área de pesquisa, totalizando 12,0 m de material. O sedimento encontrado no topo dos testemunhos 1, 2, 4, 5, 6, 7 e 9 foi coincidente com o descrito no mapa sedimentológico de Artusi (2004) utilizado para o planejamento e escolha dos pontos de coleta. O sedimento observado no testemunho 3 apresenta uma pequena diferença com relação ao indicado no mapa, isto ocorre devido às proporções de areia média e fina (A-III-6). O sedimento encontrado no topo do testemunho 8 (areia lamosa) não é coincidente com o citado no mapa.

Foram observados sete (7) tipos distintos de sedimentos: areias grossas, médias e finas, areia lamosa, lama arenosa, lama consolidada e fluida. Esta variedade favoreceu sobremaneira a análise comparativa realizada com os perfis de velocidade e os diagramas de atenuação.

Sob o ponto de vista geológico, os pacotes sedimentares coletados nos testemunhos 1, 3, 4, 6 e 8 contêm seqüências gradacionais, que podem ser associadas a depósitos de tempestade.

No cálculo da velocidade, os valores medidos, apesar de estarem sendo apresentados em uma faixa de variação, estão de acordo com aqueles conhecidos e tabelados na literatura. Os perfis de velocidade mostraram-se satisfatórios na avaliação do comportamento da onda de “US”. Estes permitiram associar as posições (em cm) ao longo dos testemunhos, com os valores de “Vp” e com os parâmetros sedimentológicos obtidos da descrição do material coletado. Este recurso também favoreceu a identificação de interfaces entre camadas de sedimento. As variações de velocidade, tanto para maior como para menor, relacionadas à mudança do tipo de material, foram registradas com precisão por esses perfis de “Vp”.

As areias (média, fina e areia lamosa) apresentaram velocidades mais altas, quando comparadas com os sedimentos lamosos. Nas areias médias foram medidos os maiores valores de “Vp” (1.752 m/s), enquanto que os menores foram registrados na lama arenosa (1.492 m/s) e na lama consolidada (1.498 m/s).

Nas seções dos testemunhos onde foram encontrados seixos, cascalhos e areia grossa, não houve registro de sinal no transdutor “RC”. Este resultado pode ser justificado pelo espalhamento (*scattering*) provocado por essas partículas no feixe sonoro. Outros trechos compostos por materiais mais finos também deixaram de registrar o sinal, isto pode ter ocorrido devido à existência de ar ou gás trapeado no sedimento.

Com relação aos resultados da atenuação, o diagrama construído permitiu uma boa avaliação do comportamento espectral do sinal, no domínio da frequência, principalmente com relação à linearidade. Este dado facilitou a análise comparativa do modo de propagação da onda para cada tipo de sedimento. Os maiores valores de atenuação, para a freqüência de 1,6 MHz, foram encontrados nas areias lamosas e nas lamas arenosas. As areias médias apresentaram uma atenuação menor que as misturas lamosas e maior que a lama consolidada. As areias finas e a lama fluida registraram os menores valores de atenuação. No entanto, conforme descrito nos capítulos anteriores, itens 4.3 e 8.3, esta propriedade acústica é susceptível a ruídos e a inúmeras variáveis durante a propagação, principalmente em meios anisotrópicos e heterogêneos. Portanto, com apenas duas medições para cada ponto, não foi possível obter valores confiáveis e absolutos de atenuação. Dependendo do objetivo de cada pesquisa, este problema pode ser solucionado com a execução de pelo menos 20 medições para cada ponto, o que permitiria processar o sinal de forma qualitativa e quantitativa.

O traçado dos gráficos em 3D forneceu dados relevantes no que diz respeito à linearidade observada entre a atenuação (dB/m) e a freqüência. Este registro ocorreu principalmente na linha 1 do testemunho 1 (Fig. 25), nas linhas 1 e 2 do testemunho 2 (Fig. 29), em alguns trechos das linhas 1 e 2 dos testemunhos 5 e 7 (Figs. 33 e 35) e nas linhas 1 e 2 do testemunho 6 (Fig. 37), o que ratifica conceitos apresentados por Hamilton (1971, 1972, 1976, 1980 e 1985), Kibblewhite (1989), Simpson *et al*. (2000 e 2003) e Buckingham (2004 e 2005).

No experimento desenvolvido nesta pesquisa, foi possível observar que, nas medições dos testemunhos 2, 3, 5, 7 e 9 (Figs. 26, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 40 e 41) e na calibração do sistema, há nitidamente um aumento na velocidade relacionado a uma diminuição da atenuação e vice-versa.

10 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados satisfatórios obtidos pelo sistema de medição desenvolvido e montado para esta pesquisa servem de base para o aperfeiçoamento do método de aquisição de dados de velocidade e atenuação de ondas acústicas. Neste aspecto, as seguintes sugestões são apresentadas:

1) A freqüência dos transdutores utilizada nesta pesquisa (2,25 MHz) apresentou bons resultados na medição de areias finas, lamas e suas misturas. No entanto, para medições em areias médias e grossas, sugere-se o uso de uma freqüência mais baixa, como exemplo: 1,0 ou 1,5 MHz. Isto implicaria em um comprimento de onda maior e, conseqüentemente, o feixe sonoro estaria menos susceptível à atenuação por espalhamento;

2) No caso de medições em testemunhos, sugere-se que as mesmas sejam realizadas tão logo o testemunho seja coletado, evitando assim a fermentação bacteriana e a formação de gases, a perda de água do sedimento ou, até mesmo, uma desidratação total do material;

3) Nos testemunhos de sondagem estudados foram encontrados pacotes sedimentares com estratificações diversas (acamamentos gradacionais, granocrescentes e contatos abruptos), cujos processos de formação merecem um estudo mais detalhado;

4) A realização de perfis sísmicos sobre os pontos onde os testemunhos foram coletados, forneceria dados valiosos do comportamento do som em um ambiente real. Estes poderiam ser comparados com os dados de velocidade e atenuação medidos em laboratório, o que representaria um grande avanço no desenvolvimento de modelos geoacústicos;

5) Foram realizadas, manualmente, 2.550 medições ao longo dos testemunhos. Como o sistema apresentou resultados compatíveis com os tabelados, para próximas medições, é sugerido que o projeto também desenvolva uma maneira automatizada de perfilar os testemunhos;

6) A realização de medidas *in situ*, através de sensores inseridos no fundo marinho, reproduziria com mais fidelidade as propriedades acústicas o meio, e evitaria uma série de fatores degradantes das medidas em laboratório;

7) Este trabalho abordou principalmente a propagação das ondas compressionais. No entanto, com a utilização de transdutores específicos para medições de ondas “S” e com um aperfeiçoamento do programa de processamento, é possível registrar o comportamento de ondas cisalhantes (S);

8) Dados de propagação de ondas “S” são importantes para o cálculo das propriedades elásticas do meio. Caso o sistema seja aperfeiçoado para este fim, novos parâmetros

geoacústicos poderão ser obtidos através da relação entre as velocidades “*Vp*” e “*Vs*”. Esses valores contribuiriam sobremaneira para o desenvolvimento de modelos acústicos do ambiente marinho; e

9) Os resultados obtidos com as medições de atenuação não foram confiáveis, uma vez que esta propriedade acústica é susceptível a ruídos. Como solução a esta limitação, ao invés de serem realizadas apenas duas medições em cada ponto do testemunho, sugere-se que para cada ponto sejam efetuadas no mínimo 20 medições.

11 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, E. C.; PONZI, V.R.A. 1984. Características morfológico-sedimentares da plataforma continental e talude superior da margem continental sudeste do Brasil. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia*, Rio de Janeiro-RJ, p.1629-1642.

ARTUSI, L. 2004. Geologia, geomorfologia e sismoestratigrafia rasa da plataforma continental ao largo da Laguna de Araruama – RJ. Niterói. *Dissertação de Mestrado* - Departamento de Geologia - LAGEMAR, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, RJ. 91 p.

ARTUSI, L.; FIGUEIREDO Jr., A G.; MACEDO, H. C.; SIMÕES, I. C. V. P. 2005. Estudos geológicos para obtenção dos parâmetros geoacústicos do fundo e subfundo marinhos para aplicações navais. *Revista Pesquisa Naval*, Serviço de Documentação da Marinha, n° 18, p. 24 - 31.

AYRES NETO, A. 1998. Relationships between physical properties and sedimentological parameters of near surface marine sediments and their applicability in the solution of engineering and environmental problems. Kiel, 1998. *Tese de Doutorado* - Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch – Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. 125 p.

AYRES, A.; THEILEN, F. 2001. Preliminary laboratory investigations into attenuation of compressional and shear waves on near-surface marine sediments. *Geophysical Prospecting*, European Association of Geoscientists & engineers. Vol. 49, p. 120 – 127.

BARBAGELATA, A.; RICHARDSON, M.D.; MIASCHI, B.; MUZI, E.; GUERRINI, P.; TROIANO, L.; AKAL, T. 1991. An *in situ* sediment acoustic measurement system. In: Hovem, J.M. (Ed.), Shear Waves in Marine Sediments. Kluwer, Dordrecht, p. 305 - 312.

BEST, A I.; McCANN C.; SOTHCOTT, J. 1994. The relationships between the velocities, attenuations and petrophysical properties of reservoir sedimentary rocks. Artigo apresentado no *53rd EAEG meeting*, Florence. *Geophysical Prospecting*, Vol. 42, p. 151 – 178.

BEST, A I.; McCANN C.1995. Seismic attenuation and pore-fluid viscosity in clay-rich reservoir sandstones. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists. Vol. 60, n° 5, p. 1386 – 1397.

BIOT, M. A. 1956a. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* , v. 28, n. 2, p. 168–178.

BIOT, M. A. 1956b. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* , v. 28, n. 2, p. 179–191.

BORGELD, J.C., HUGHES CLARKE, J.E., GOFF, J.A., MAYER, L.A., CURTIS, J.A. 1999. Acoustic backscatter of the 1995 flood deposit on the Eel shelf. *Marine Geology,* v. 154, p. 197 - 210.

BOWLES, F.A. 1997. Observations on attenuation and shearwave velocity in fine-grained, marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 101, n. 5, p. 1 - 13.

BOYCE, R.E. 1976. Definitions and laboratory techniques of compressional sound velocity parameters and wet-water content, wet-bulk density and porosity parameters by gravimetric and gamma-ray attenuation techniques. *Init. Rep.* DSDP 33, p. 931 - 951.

BRAILE, L. 2004. Seismology, Geophysics and Science Education. Department of Earth and Atmospheric Science, Purdue University. (www.eas.purdue.edu/~braile).

BROWN, R. J. S.; KORRINGA, J. 1975. On the dependence of the elastic properties of a porous rock on the compressibility of the pore fluid. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists. Vol. 40, n° 4, p. 608 – 616.

BUCKINGHAM, M. J. 1997. Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 102, p. 2579–2596.

BUCKINGHAM, M. J. 2000. Wave propagation, stress relaxation, and grain-to-grain shearing in saturated, unconsolidated marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.* , v. 108, p. 2796–2815.

BUCKINGHAM, M. J. 2004. A three-parameter dispersion relationship for Biot's fast compressional wave in marine sediment. *J. Acoust. Soc. Am.* , v. 116, p. 769–776.

BUCKINGHAM, M. J. 2005. Compressional and shear wave properties of marine sediments: comparisons between theory and data. *J. Acoust. Soc. Am.* , v. 117, n. 1, p. 137-152.

CARVALHO, V. M. S. G. 1990. Morfologia e sedimentação da plataforma continental interna entre Saquarema e Cabo Frio - RJ. *Dissertação de Mestrado*, Instituto de Geociências - Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 90p.

DAVIS, A. M. 1992. Shallow gas: an overview. *Continental Shelf Research*, v. 12, n. 10, p. 1077-1079.

DAVIS, A.; HAYNES, R.; BENNELL, J.; HUWS, D. 2002. Surficial seabed sediment properties derived from seismic profiler responses. *Marine Geology*, v. 182**,** p. 209-223.

DE-HUA HAN, A NUR; MORGAN, D. 1986. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists. Vol. 51, n° 11, p. 2093 – 2107.

DIAS, G. T. M.; PALMA, J.J.C.; PONZI, V.R.A. 1982. Matéria orgânica no Quaternário da margem continental entre o Rio de Janeiro e Guarapari-RJ. Rio de Janeiro, LAGEMAR/IG-UFRJ-CENPES/PETROBRÁS, Rio de Janeiro-RJ. 136p. (Relatório final).

DIAS, G. T. M. 1996. Classificação de sedimentos marinhos: proposta de representação em cartas sedimentológicas. *Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia*, SBG, Salvador, BA. Vol. 3, p. 423 – 426.

DOBRIN, M. B.; SAVIT, C. H. 1988. Introduction to Geophysical Prospecting. 4 ed. New York, USA. McGraw-Hill, Inc. 867 p.

DOMENICO, S. N. 1984. Rock lithology and porosity determination from shear and compressional wave velocity. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists. Vol. 49, n° 8, p. 1188 - 1195.

DUARTE, O. O. 2003. Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia. Ed. 2, Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, RJ. 352 p.

FETTER, A L.; WALECKA, J. D. 1980. Theoretical mechanics of particles and continua. Ed.1, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, USA. 570 p.

FIGUEIREDO Jr., A G.; KOWSMANN, R. O. 1976. Interpretação dos registros de sonar de varredura lateral obtidos na plataforma riograndense durante a Operação Geomar VII. *Projeto Remac/Petrobras*, Rio de janeiro, relatório, 9 p.

FIGUEIREDO Jr., A G. 1980. Response of water column to strong wind forcing, southern Brazilian inner shelf: Implication for sand ridge formation. *Marine geology*, v. 35, p. 367 -376.

FIGUEIREDO Jr., A G.; SANDERS, J. E.; SWIFT, D. J. P. 1982. Storm-graded layers on inner continental shelves: examples from southern Brazil and Atlantic coast of central United States. *Sedimentary Geology*, Elsevier Scientific Publishing Company, v. 31, p. 171 – 190.

FIGUEIREDO Jr., A. G.; NITTROUER, C. A.; COSTA, E. A. 1996. Gas-charged sediments in the Amazon submarine delta. *Geo-Marine Letters*, v.16, p. 31-35.

FIGUEIREDO Jr., A. G.; MADUREIRA, L. S. P. 1999. Programa de avaliação do potencial sustentável de recursos vivos na zona econômica exclusiva (REVIZEE) – *Relatório final dos dados geológicos*, Lagemar - UFF e FURG, 58 p.

FISCHER, G. 1996. Report and preliminary results of METEOR-Cruise M 34/4, Vol. II, Recife – Bridgetown, 19.3. – 15.4. 1996. Berichte, Fachbereich, Geowissenschaften, Universität Bremen, n° 80, 105 p.

FISH, P. 1990. Physics and instrumentation of diagnostic medical ultrasound. Trowbridge, Wiltshire, UK: Redwood Books, 250 p.

FLOODGATE, G. D.; JUDD, A G. 1992. The origins of shallow gas. *Continental Shelf Research*, v. 12 (10), p. 1145 – 1156.

FRAZER, L. N., FU, S-S. 1999. Seabed attenuation profiles from a movable sub-bottom acoustic vertical array. *J. Acoust. Soc. Am.* , v. 106 (1), p. 120 – 130.

FREDERICHS, T.; SCHMIEDER, F.; HÜBSCHER, C.; FIGUEIREDO Jr., A. G.; COSTA, E. 1997. Physical Properties Studies. Report and preliminary results of METEOR-Cruise M 34/4, Vol. II, Recife – Bridgetown, 19.3. – 15.4. 1996. Berichte, Fachbereich, Geowissenschaften, Universität Bremen, n° 80, 105 p.

FREUND, D. 1992. Ultrasonic compressional and shear velocities in dry clastic rocks as a function of porosity, clay content, and confining pressure. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists. Vol. 108, p. 125- 135.

FU, S.S. 1998. The Experimental Study of In-Situ Acoustic Properties in Marine Sediments. *Unpublished PhD thesis*, University of Hawaii, Manoa, 146 pp.

GLADWIN, M. T.; STACEY, E. D. 1974. Anelastic degradation of acoustic pulses in rock. *Physics of the Earth and Planetary interiors*, 8 p. 332 – 336.

GORGAS, T. J.; WILKENS, R. H.; FU, S. S.; FRAZER, L. N.; RICHARDSON, M. D.; BRIGGS, K. B.; LEE, H. 2002. In situ acoustic and laboratory ultrasonic sound speed and attenuation measured in heterogeneous soft seabed sediments: Eel River shelf, California. *Marine Geology*, v. 182, p. 103 – 119.

GRECO, A. 2001. Abordagem teórica e experimental de um método ultra-sônico para medir espessura e velocidade de onda em meios estratificados. *Tese de Doutorado*, Programa de Engenharia Biomédica - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 127 p.

GROSSMANN, G. S. 2002. Processamento e interpretação de dados sísmicos de *parasound* no delta submarino do Amazonas. *Dissertação de Mestrado* - Departamento de Geologia - LAGEMAR, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, RJ. 78 p.

GUIMARÃES, M. S. B. 2004. Análise integrada de propriedades petrofísicas, petrográficas e geoquímicas de folhelhos. *Dissertação de Mestrado*. Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 237 p.

HAMILTON, E. L. 1971. Elastic properties of marine sediments. *J. Geophys. Res.*, v. 76, p. 579–604.

HAMILTON, E. L. 1972. Compressional-wave attenuation in marine sediments. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 37, p. 620–646.

HAMILTON, E. L. 1976. Sound attenuation as a function of depth in the sea floor. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 59, p. 528–535.

HAMILTON, E. L. 1979. Sound velocity gradients in marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.* , v. 65, p. 909–922.

HAMILTON, E. L. 1980. Geoacoustic modeling of the sea floor. *J. Acoust. Soc. Am.* , v. 68, p. 1313–1336.

HAMILTON, E. L.; BACHMAN, R. T. 1982. Sound velocity and related properties of marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 72, p. 1891–1904.

HAMILTON, E. L. 1985. Sound velocity as a function of depth in marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 78, p. 1348–1355.

HE, P.; ZENG, J. 2001. Acoustic dispersion and attenuation measurement using both transmitted and reflected pulses. *Ultrasonics*, Elsevier Scientific Publishing Company, v. 39, p. 27 – 32.

JOHNSTON, J. E.; CHRISTENSEN, N. I. 1995. Seismic anisotropy of shales. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, n° B4, p. 5991 – 6003.

KIBBLEWHITE, A C. 1989. Attenuation of sound in marine sediments: a review with emphasis on new low-frequency data. *J. Acoust. Soc. Am.* , v. 86 (2), p. 716 – 738.

KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. 1982. Fundamentals of acoustics. John Wiley e Sons, Inc. 3 ed. New York, USA. 479 p.

KJARTANSSON, E. 1979. Constant Q-wave propagation and attenuation. *Journal of Geophysical Research*, v. 84, p. 4737 - 4748.

KRUMBEIN, W. C.; PETTIJOHN, F. J. 1988. Manual of sedimentary petrografhy. Classic facsimile edition. Tulsa, Oklahoma, U.S.A. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists.

KUMAR, N.; SANDERS, J. E. 1976. Characteristics of shoreface storm deposits: Modern and ancient examples. *J. Sediment. Petrol.*, v. 46, p. 145 – 162.

LE RAVALEC, M.; GUÉGUEN, Y. 1996. High- and low-frequency elastic moduli for a saturated porous/cracked rock- Differential self-consistent and poroeslastic theories. *Geophysics*, v. 61, n. 4, p. 1080 – 1094.

LEURER, K.C. 1997. Attenuation in fine-grained marine sediments: extension of the Biot-Stoll model by the effective grain model (EGM). *Geophysics*, v. 62, p. 1465 - 1479.

MAA, Jerome P. –Y.; SUN K.-J.; HE Q. 1997. Ultrasonic characterization of marine sediments: a preliminary study. *Marine Geology*, Elsevier Science, v. 141. p. 183-192.

MACEDO, H. C.; FIGUEIREDO Jr., A G.; ARTUSI, L.; SOUZA, S. R. 2005a. Análise da propagação de ondas compressionais em sedimentos marinhos e sua aplicação na caracterização das propriedades acústicas do ambiente. *9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Salvador, BA.

MACEDO, H. C.; FIGUEIREDO Jr., A G.; ARTUSI, L.; SOUZA, S. R. 2005b. Análise das propriedades acústicas de sedimentos marinhos coletados por meio de testemunhos de sondagem. *X Congresso Brasileiro da ABEQUA* – Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Guarapari, ES.

MACEDO, H. C.; FIGUEIREDO Jr., A G. 2005. Sistema de medição de velocidade e atenuação de onda compressional em sedimentos marinhos. *9° Simpósio de Geologia do Sudeste*, realizado na Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ.

MARTIN, L. R.; MELO, V.; FRANÇA, A M. C.; SANTANA, I.; MARTINS, I. R. 1972. Distribuição faciológica da margem continental sul riograndense. *Congresso Brasileiro de Geologia*, 26, Belém, Anais, Belém, Soc. Bras. Geol., p. 115 – 132.

MARTIN, L. R.; URIEN, C. M.; MARTINS, I. R.; PONZI, V. R. 1977. Camadas gradacionais na plataforma interna do Rio Grande do Sul. *Anais Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil*, Rio de Janeiro, Tomo 34: p. 13 – 25.

MARTIN, L. R.; SUGUIO, K.; DOMINGUEZ, J.M.L.; FLEXOR, J-M. 1997. Geologia do Quaternário costeiro do litoral norte do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. CPRM/FAPESP, Belo Horizonte-MG, 112p. C/ 2 mapas.

MATSUMOTO, Élia Y. 2003. MATLAB 6 - Fundamentos de programação. Editora Érica Ltda, São Paulo, SP. 310 p.

McCANN, C.; McCANN, D. M. 1969. The attenuation of compressional wave in marine sediments. *Geophysics*, v. 50, p. 1311 – 1317.

McCANN, C.; McCANN, D. M. 1990. The acoustic properties of marine sediments. Defence Applications, Spearhead Exhibitions Limited, Brighton, UK. Vol. 3, 8 p.

McLEROY, E. G.; DeLOACH, A .1968. Sound speed and attenuation, from 15 to 1500 kHz, measured in natural sea-floor sediments. *J. Acoust. Soc. Am*. v. 44, n° 4, p. 1148 – 1150.

MEYER, E. 1957. Air bubbles in water, chapt. 5, in v. II, Ultrasonic range, under water acoustics, technical aspects of sound. Editor; Richardson, E. G., London. *Elsevier Publishing Co*.

MOREIRA, P. C.; MENDONÇA, C. F. 1976. A ressurgência em Cabo Frio (II). Significação física da charneira. Instituto de Pesquisas da Marinha, IPqM. n° 99. Rio de Janeiro – RJ. 68

MUEHE, D.; CARVALHO, V. G. 1993. Geomorfologia, cobertura sedimentar e transporte de sedimentos na plataforma continental interna entre a Ponta de Saquarema e o Cabo Frio (RJ). *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 41: p. 1-12.

MURPHY, W. F.; WINKLER, K. W.; KLEINBERG, R. L. 1986. Acoustic relaxation in sedimentary rocks: dependence on grain contacts and fluid saturation. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists. Vol. 51, n° 3, p. 757 - 766.

PANAMETRICS-NDT. Ultrasonic transducer catalog and technical notes. Disponível em: <http://www.panametrics-ndt.com/ndt/ndt_transducers>. Acesso em: dezembro 2005.

PARASNIS D.S. 1973. Methods in Geochemistry and geophysics. 2 ed. Amsterdam, Holland. Elsevier Scientific Publishing Company. 395 p.

PONZI, V. R. A.; OLIVEIRA, K.P.; REIS, M.C.B. 1990. Evidências paleoambientais em testemunhos da plataforma continental do Rio de Janeiro. *36º Congresso Brasileiro de Geologia*, Natal-RN. v.2, p.567-579.

QUEVEDO, C. P. 2000. Cálculo Avançado. Editora Interciências, Rio de Janeiro, RJ.173 p.

QUEVEDO, C. P. 1997. Matemática Superior. Editora Interciências, Rio de Janeiro, RJ. 126 p.

READING, H.G. (Ed) 1996. Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy. *Blackwell Science*, 3 ed., p. 688.

RICHARDSON, M. D.; BRIGGS, K. B. 1996. In situ and laboratory geoacoustic measurements in soft mud and hard-packed sand sediments: Implications for high-frequency acoustic propagation and scattering. *Geo-Marine Letters*, v. 16, p. 196–203.

RICHARDSON, M. D.; BRIGGS, K. B. 2004. Empirical predictions of seafloor properties based on remotely measured sediment impedance. *High Frequency Ocean Acoustics.* Editors: Porter, M. B.; Siderius, M.; Kuperman, W.A. La Jolla, California, USA. American Institute of Physics , p. 12 – 21.

RICHARDSON, M. D. 1997. In-situ, shallow-water sediment geoacoustic properties. *Shallow-Water Acoustics*, edited by R. Zhang and J. Zhou (China Ocean, Beijing, China). p. 163–170.

RICHARDSON, M. D. 2002. Variability of shear wave speed and attenuation in superficial marine sediments, in Impact of Littoral Environmental Variability on Acoustic Predictions and Sonar Performance, edited by N. G. Pace and F. B. Jensen - Kluwer, La Spezia, p. 107–114.

SHEPARD, F. P. 1954. Nomenclature based on sand– silt –clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 24 (3), p. 151 – 158.

SHUMWAY, G.; IGELMAN, K. 1960. Computed sediment grain surfeca area. *J. Sed. Petrology*, v. 30, p. 486 – 498.

SIMPSON, H. J.; HOUSTON, B. H. 2000. Synthetic array measurements of acoustic waves propagating into a water-saturated sandy bottom for a smoothed and roughened interface. *J. Acoust. Soc. Am*., v. 107, p. 2329 – 2337.

SIMPSON, H. J.; HOUSTON, B. H.; LISKEY, S. W. 2003. At-sea measurements of sound penetration into sediments using a buried vertical synthetic array. *J. Acoust. Soc. Am*. v. 114, p. 1281 – 1290.

SILVA, C.G.; FIGUEIREDO Jr., A G.; BREHME, I. 2000. Granulados litoclásticos. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, Vol.18 (3), p 319 - 326.

STOLL, R. D.; BRYAN, G. M. 1970. Wave attenuation in saturated sediments. *J. Acoust. Soc. Am., v*. 47, n. 5 (2), p. 1440 – 1447.

STOLL, R. D. 1980. Theoretical aspects of sound transmission in sediments. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 68 (5), p. 1341 – 1350.

STOLL, R. D. 1985. Marine sediments acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 77 (5), p. 1789 – 1799.

SUGUIO, K. 1973. Introdução à sedimentologia. 1 ed. Edgard Blücher ltda, São Paulo, SP. 317 p.

SUN, Z.; YING, H. 1999. The speed of sound in water as a function of temperature. *Ultrasonics*, Elsevier Scientific Publishing Company, v. 37, p. 107 – 122.

TAO, G.; KING, M. S.; NABI-BIDHENDI, M. 1986. Ultrasonic wave propagation in dry and brine-saturated sandstones as a function of effective stress: laboratory measurements and modeling. *Artigo apresentado no 54th EAEG meeting*, Paris, 1992. *Geophysical Prospecting*, Vol. 43, p. 299 – 327.

URICK, R. J. 1975. Principles of underwater sound. Ed. 2, McGraw-Hill Book Company, New York, EUA. 455 p.

US GEOLOGICAL SURVEY. 2000. Public Review Draft - Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization, Prepared in cooperation with the Geological Data Subcommittee of the Federal Geographic Data Committee, Open-File Report 99-430 Online Version1.0 (http://structure.harvard.edu/~plesch/map%20patterns).

WINKLER, K. W.; NUR, A . 1982. Seismic attenuation: Effects of pore fluids and frictional sliding. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists. Vol. 47, n° 1, p. 1 – 15.

WINTERSTEIN, D. F. 1990. Velocity anisotropy terminology for geophysicists. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Vol. 55, n° 8, p. 1070 - 1088.

WOODS, R. D. 1991. Soil properties for shear wave propagation. *Kluwer Academy Publishers*, Netherlands, p. 29 – 39.

ZISKIN, M. C.; LEWIN, P. A. 1992. Ultrasonic Exposimetry. CRC *Press*, London, UK. 457 p.

12 - GLOSSÁRIO

Análise espectral – análise da variação da amplitude e fase de um sinal, em função da freqüência.

Cisalhamento – esforço tangencial a superfície de um sólido. Deformação que tende a fazer com que as partes contíguas de uma rocha deslizem, uma em relação à outra.

Correntes de turbidez – denominação dada às correntes de densidade relacionadas com avalanches, deslizamentos ou escorregamentos de massas submarinas de sedimentos, responsáveis pela formação de depósitos de turbiditos.

Discordâncias – em geologia, superfície de erosão ou de não deposição, que separa estratos de sedimentos mais antigos dos mais recentes, representando um hiato no tempo.

Embasamento acústico – região profunda da crosta oceânica onde os estratos não podem mais ser detectados por reflexão sísmica.

Espectro – gráfico que mostra a variação de uma grandeza, magnitude, fase ou potência, em função do tempo, da freqüência, ou da distância, etc.

Estratificação – em geologia, designação dos processos de formação de unidades sedimentares tabulares como camadas, lâminas, lentes, etc.

Fácies sedimentares – conjunto de caracteres de natureza genética: cor, composição, fósseis, textura, estruturas sedimentares, geometria das camadas, que servem de diferenciação de uma rocha ou sedimento.

Força de Coriolis – aceleração de um corpo em movimento, devido à rotação da Terra. É definida pela fórmula: $a = 2.w.v.\text{sen}L$, onde w representa a velocidade angular da Terra, v a velocidade do corpo e L é a latitude. O efeito de Coriolis produz uma deflexão para direita em corpos ou massas fluidas, no hemisfério norte, e para esquerda, no hemisfério sul.

Fragmentos biodetríticos - são resíduos e fósseis de organismos diversos, dentre os quais podem ser mencionados: algas calcárias, moluscos, crustáceos, foraminíferos, briozoários e ostracodes.

Interfaces – superfície de contato entre dois meios.

LabView – é uma linguagem de programação gráfica, fundamentada em diagramas de blocos, usada para aquisição de dados e controle de equipamentos de medição.

MatLab - é um "software" interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. Integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos. É um sistema interativo cujo elemento básico de informação é uma matriz que não requer dimensionamento.

Offshore – mar adentro. Região de plataforma continental com lâmina d`água superior a 10 m.

Regressão marinha – movimento da linha de costa em direção ao mar, provocado basicamente pela variação do nível do mar. Uma indicação deste fenômeno é a migração das fácies litorâneas também na direção do mar.

REVIZZE – Programa de avaliação do potencial sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva.

Sedimentos biogênicos - sedimentos resultantes da atividade fisiológica de organismos, tais como algas e corais. Os sedimentos assim formados são chamados de *biolititos* e são caracterizados por exibirem um arcabouço orgânico.

Sedimentos carbonáticos – são compostos especialmente por esqueletos calcários, com grande concentração de carbonato de cálcio.

Sedimentos terrígenos – ou inorgânicos são compostos por material erodido dos continentes (transportados pelos rios, ventos e gelo), cinzas vulcânicas e poeira de meteoritos. Estes depósitos são geralmente mais significativos próximo aos continentes ou em regiões profundas das bacias oceânicas.

Seqüência deposicional – unidade estratigráfica formada por uma série de estratos, limitada por discordâncias.

Sísmica de reflexão - é um método indireto de exploração da subsuperfície da terra. A aquisição é feita usando uma fonte para gerar ondas sísmicas que se propagam abaixo da superfície da terra. Quando a onda sísmica alcança uma interface entre duas camadas de rocha com valores de impedância acústica diferentes, parte da onda é refratada e continua viajando para baixo; outra parte é refletida e retorna à superfície. A parte refletida da onda é captada em receptores e gravada nos sismógrafos. O sismógrafo armazena tanto o tempo de chegada da onda quanto a intensidade medida.

Slot - é um termo em inglês utilizado para designar ranhura, fenda, conector, encaixe ou espaço. Sua função é ligar os periféricos ao barramento e suas velocidades são correspondentes as dos seus respectivos barramentos.

APÊNDICE I – DESCRIÇÃO SEDIMENTOLÓGICA DOS TESTEMUNHOS

LAGEMAR
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Laboratório de Geologia Marinha — Amostra - Testemunho 1
Projeto: Dissertação de Mestrado — Descrito por: Helber C. Macedo
Coord.: 22° 59,2' S - 042° 02,1' W — Profundidade: 41,2 m — Data 19/04/2005
Localização: Área de Pesquisa — Página 1 *de* 1

GRANULOMETRIA								Profundidade (cm)	Conchas & Carbonatos	Descrição do Testemunho
	AREIA					LAMA				
C	MG	G	M	F	MF	S	ARGILA			
								0		Areia média quartzosa, com fragmentos biodetríticos aumentando de tamanho e quantidade em direção a base, dimensão de 0,5 a 2,5 mm . Não existem estruturas sedimentares.
								10		
								20		
								30		
								40		
								50		
								58		

A - I - 1

LAGEMAR
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Laboratório de Geologia Marinha
Projeto: Dissertação de Mestrado
Coord.: 23° 00,1' S - 042° 01,3' W
Localização: Área de Pesquisa

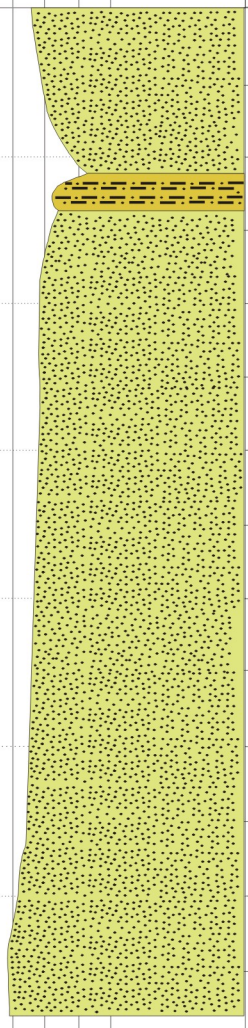
Amostra - Testemunho 2
Descrito por: Helber C. Macedo
Profundidade: 49,4 m Data 19/04/2005
Página 1 *de* 1

GRANULOMETRIA

AREIA						LAMA	
C	MG	G	M	F	MF	S	ARGILA

Profundidade (cm)

Conchas & Carbonatos



10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
137

Descrição do Testemunho

Do ponto 0 até 23 cm, areia fina quartzosa.

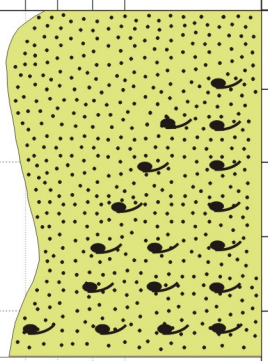
Entre os pontos 23 e 26 cm há uma estrutura sedimentar de areia lamosa, com fragmentos biodetríticos de dimensão de até 1,5 mm.

Após o ponto 26 cm, areia fina quartzosa.

LAGEMAR
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Laboratório de Geologia Marinha — Amostra - Testemunho 3
Projeto: Dissertação de Mestrado — Descrito por: Helber C. Macedo
Coord.: 23° 00,4' S - 042° 01,2' W — Profundidade: 52,1 m — Data 19/04/2005
Localização: Área de Pesquisa — Página 1 *de* 1

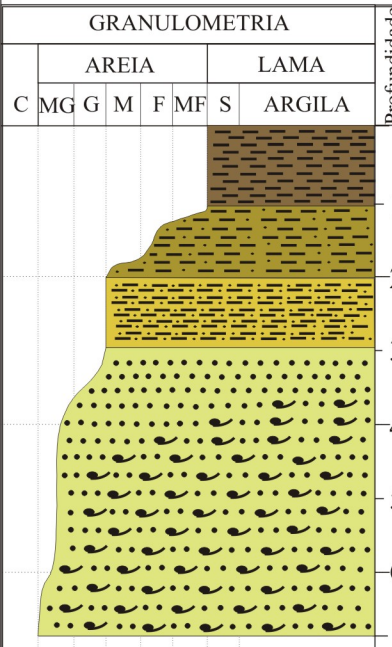
GRANULOMETRIA								Profundidade (cm)	Conchas & Carbonatos	Descrição do Testemunho
	AREIA					LAMA				
C	MG	G	M	F	MF	S	ARGILA			
								0		Areias quartzosas de granulometria média (na proporção de 65%) e fina a 35%, com fragmentos biodetríticos aumentando em tamanho e quantidade em direção a base.
								10		
								20		Dimensão dos fragmentos variando de 1 a 1,8 mm.
								30		
								40		
								46		



A - I - 3

LAGEMAR
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Laboratório de Geologia Marinha — Amostra - Testemunho 4
Projeto: Dissertação de Mestrado — Descrito por: Helber C. Macedo
Coord.: 23° 02,3' S - 041° 59,6' W — Profundidade: 93,5 m — Data 19/04/2005
Localização: Área de Pesquisa — Página 1 *de* 1



Profundidade (cm)

Conchas & Carbonatos

Descrição do Testemunho

10
20
30
40
50
60
69

De 0 a 10 cm, lama com poucos fragmentos biodedtríticos

De 10 a 20 cm, lama arenosa bioclástica com a areia de granulometria média.

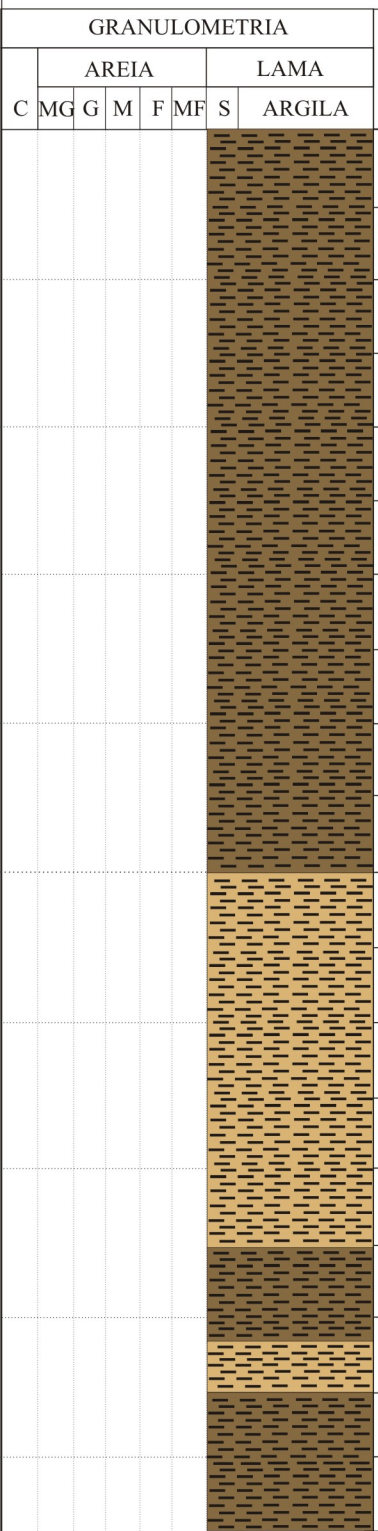
De 20 a 30 cm, areia lamosa bio-litoclástica, com a areia de granulometria média.

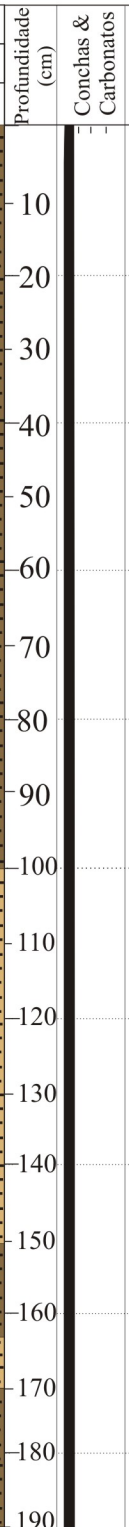
De 30 cm até o final, areias grossas e muito grossas bio-litoclásticas. Muitos fragmentos biodetríticos de dimensões variando entre de 1 mm a 4 cm.

Sequência sedimentar granodecrescente.

LAGEMAR
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Laboratório de Geologia Marinha — Amostra - Testemunho 5
Projeto: Dissertação de Mestrado — Descrito por: Helber C. Macedo
Coord.: 23° 00,1' S - 041° 58,1' W — Profundidade: 63,3 m — Data 19/04/2005
Localização: Área de Pesquisa — Página 1 *de* 1





Descrição do Testemunho

De 0 a 100 cm, lama compactada.
Não existem estruturas sedimentares.

De 100 a 150 cm, lama fluida.

De 150 a 163 cm, lama compactada.

De 163 a 170 cm, lama fluida.

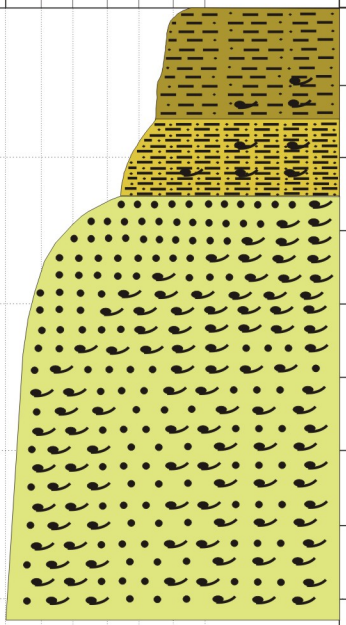
De 170 até o final, lama compactada.
Concentração de biodetritos menor que 5 %.

LAGEMAR
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Laboratório de Geologia Marinha
Projeto: Dissertação de Mestrado
Coord.: 23° 01,3' S - 042° 00' W
Localização: Área de Pesquisa

Amostra - Testemunho 6
Descrito por: Helber C. Macedo
Profundidade: 87,5 m Data 19/04/2005
Página 1 *de* 1

GRANULOMETRIA								Profundidade (cm)	Conchas & Carbonatos	Descrição do Testemunho
	AREIA						LAMA			
C	MG	G	M	F	MF	S	ARGILA			



10
20
30
40
50
60
70
82

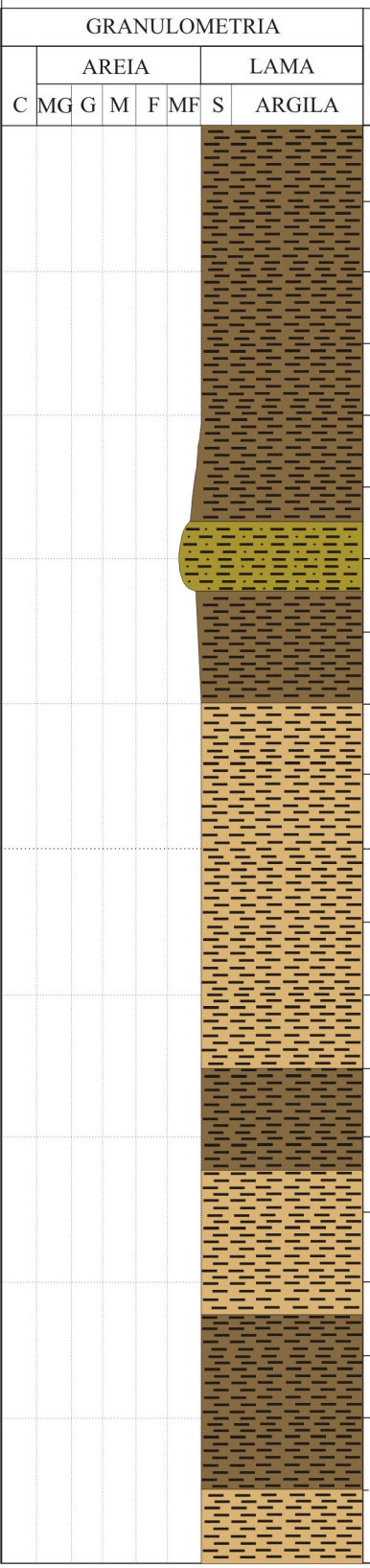
De 0 a 15 cm, lama arenosa bioclástica. Areia de granulometria fina.Fragnentos biodetríticos após o ponto 9 cm, dimensões de 0,5 mm a 2 cm.

De 15 a 25 cm, areia lamosa bioclástica. Areia de granulometria fina. Fragmentos biodetríticos, com dimensões variando de 1 mm a 4,5 cm.
De 25 cm até o final, areia grossa e muito grossa bio-litoclástico.

Muitos fragmentos biodetríticos, com dimensões variando de 1 mm a 5 cm. Sequência granodecrescente.

LAGEMAR
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Laboratório de Geologia Marinha — Amostra - Testemunho 7
Projeto: Dissertação de Mestrado — Descrito por: Helber C. Macedo
Coord.: 23° 06,1' S - 041° 58,0' W — Profundidade: 110,5 m — Data 20/04/2005
Localização: Área de Pesquisa — Página 1 *de* 1



Descrição do Testemunho

De 0 a 55 cm, lama compactada.
Não existem estruturas sedimentares.
Concentração de biodetritos menor que 5%.

De 55 cm a 63, estreita camada de lama arenosa, com areia de granulometria fina.

De 63 a 80 cm, lama compactada.

De 80 a 130 cm, lama fluida.

De 130 a 145 cm, lama compactada.

De 145 a 165 cm, lama fluida.

De 165 a 190 cm, lama compactada.

De 190 até o final, lama fluida.

LAGEMAR
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

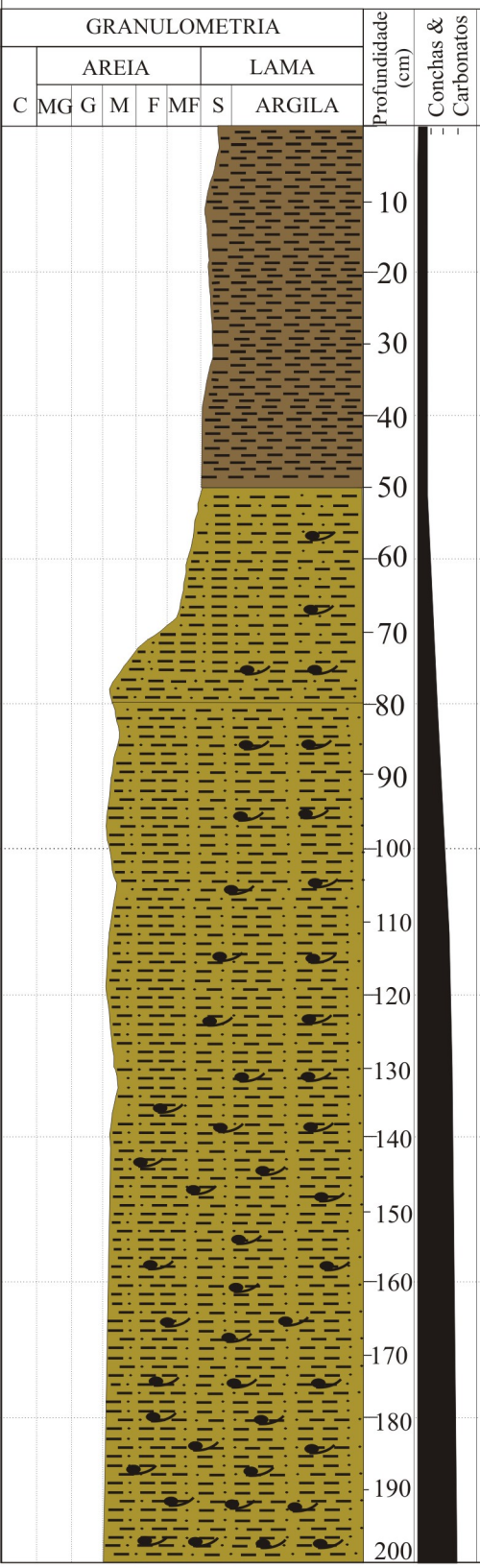
Laboratório de Geologia Marinha
Projeto: Dissertação de Mestrado
Coord.: 23° 11,9' S - 042° 08,1' W
Localização: Área de Pesquisa

Amostra - Testemunho 8
Descrito por: Helber C. Macedo
Profundidade: 119,5 m Data 20/04/2005
Página 1 *de* 1

GRANULOMETRIA								Profundidade (cm)	Conchas & Carbonatos	Descrição do Testemunho
	AREIA					LAMA				
C	MG	G	M	F	MF	S	ARGILA			
								0		De 0 a 5 cm, areia lamosa bioclástica, areia de granulometria fina.
								10		De 5 a 20 cm, areia lamosa bioclástica, areia de granulometria média. Fragmentos biodetríticos aumentando de tamanho em direção ao pto 50 cm, dimensões de 0,5 mm a 4 cm.
								20		
								30		De 20 a 50 cm, areia bio-litoclástico grossa e muito grossa.
								40		
								50		De 50 cm até o final, areia média bioclástica, com presença de fragmentos biodetríticos.
								60		
								68		

Laboratório de Geologia Marinha — Amostra - Testemunho 9
Projeto: Dissertação de Mestrado — Descrito por: Helber C. Macedo
Coord.: 23° 02,0' S - 041° 59,5' W — Profundidade: 90,5 m — Data 20/04/2005
Localização: Área de Pesquisa — Página 1 *de* 1

LAGEMAR
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE



Descrição do Testemunho

De 0 a 50 cm, lama compactada.

De 50 a 80 cm, lama arenosa bio-clástica.
Concentração de fragmentos biodetríticos de 20 %, dimensão variando de 0,5 a 1 mm.

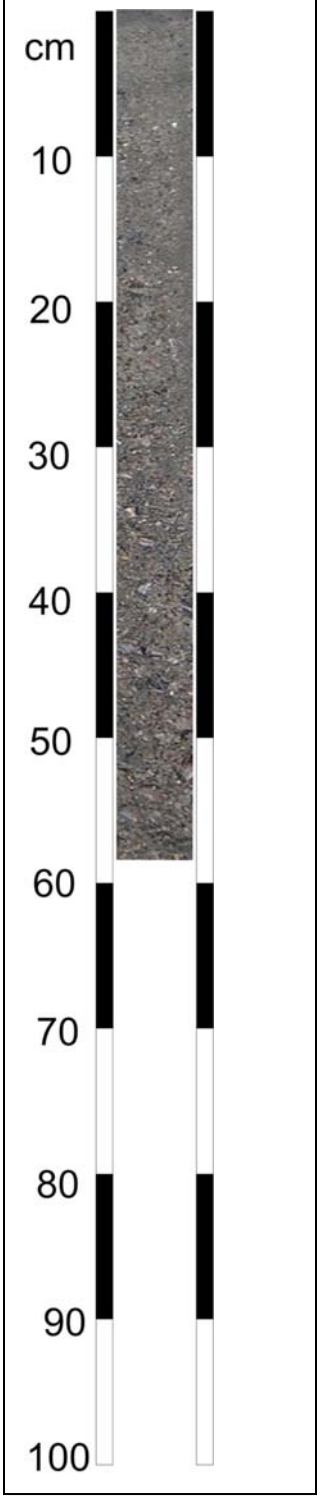
De 80 a 110 cm, lama arenosa bio-clástica.
Concentração de fragmentos biodetríticos de 40 %, dimensão variando de 0,5 a 1,5 mm.

De 110 até o final, lama arenosa bio-clástica.
Concentração de fragmentos biodetríticos aumentando de 40 % deste ponto até 70 % na base, dimensão variando de 0,5 a 2 mm.
Sequência granodecrescente.

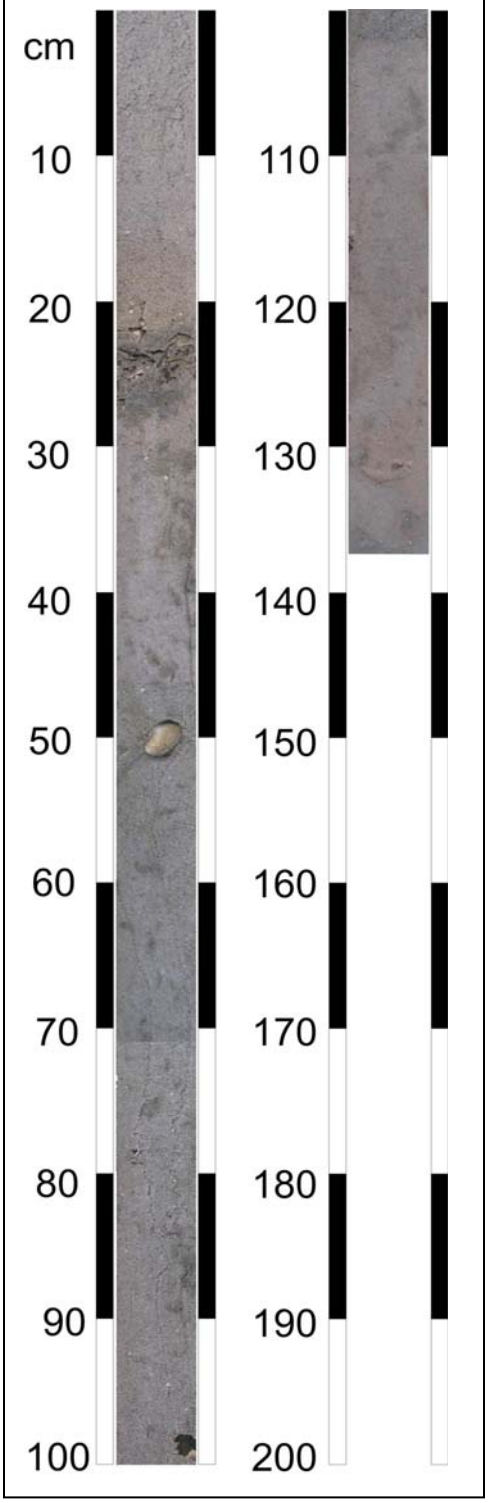
A - I - 9

APÊNDICE II – FOTOGRAFIAS DOS TESTEMUNHOS ABERTOS

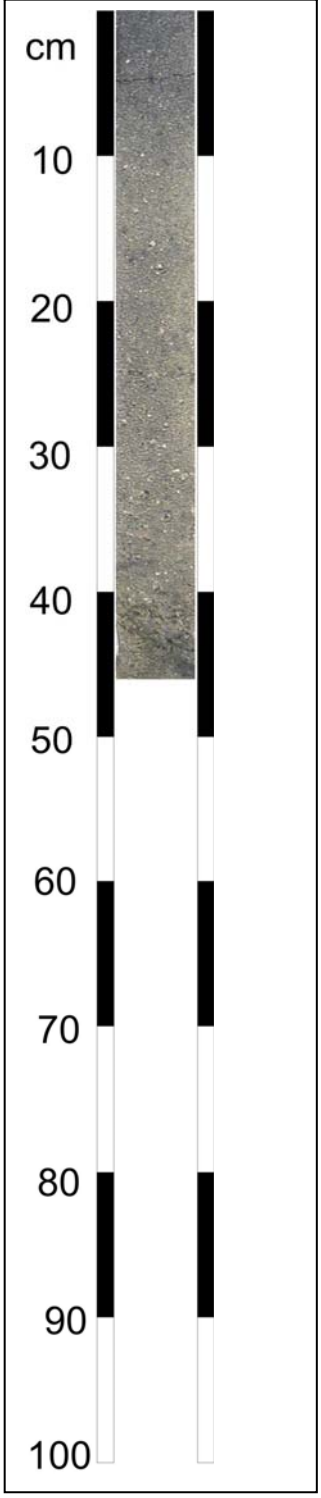
TESTEMUNHO 01



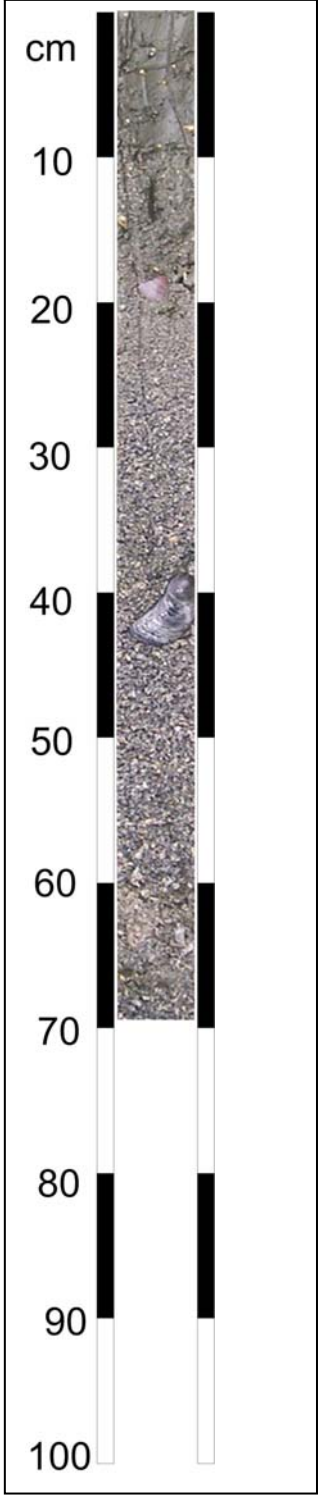
TESTEMUNHO 02



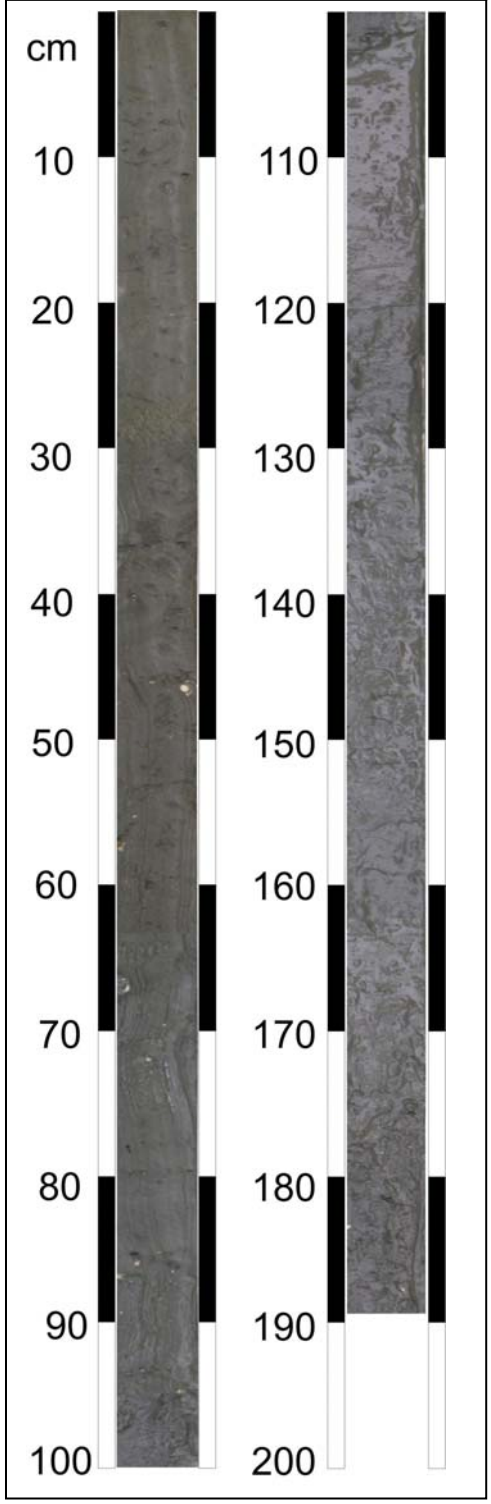
TESTEMUNHO 03



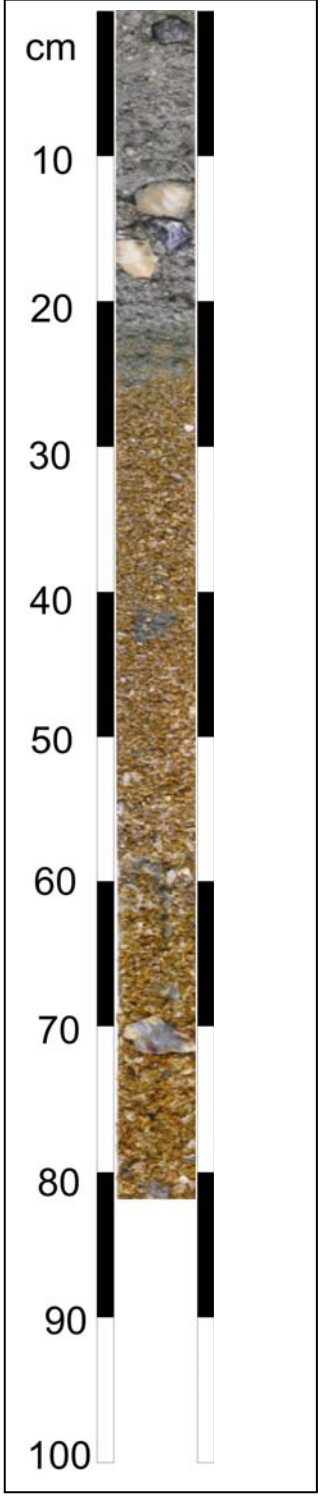
TESTEMUNHO 04



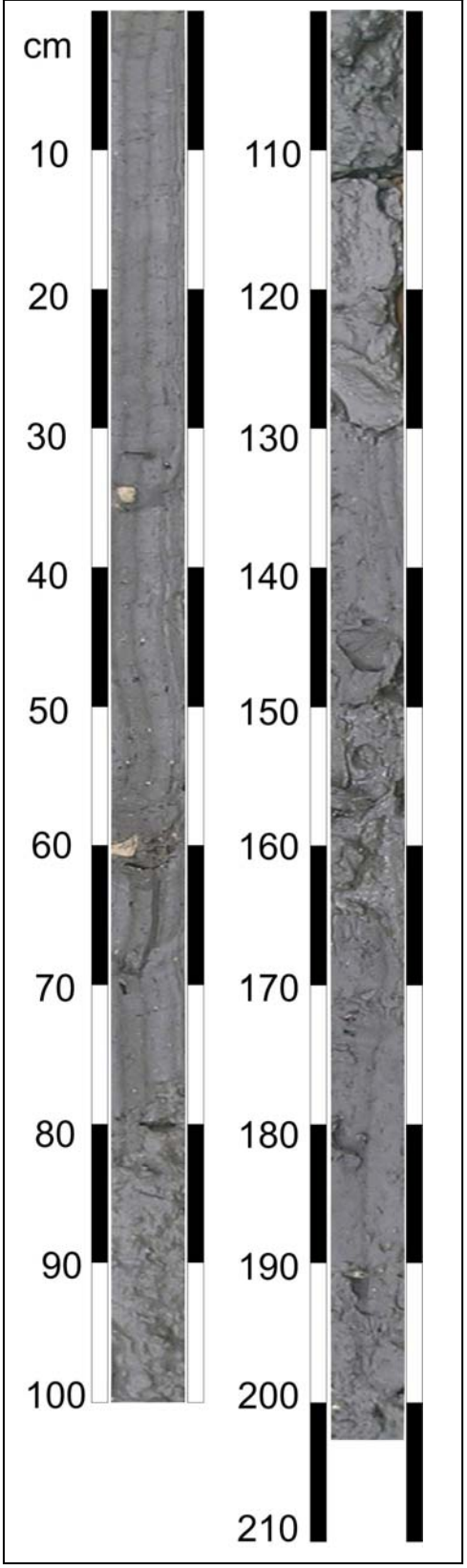
TESTEMUNHO 05



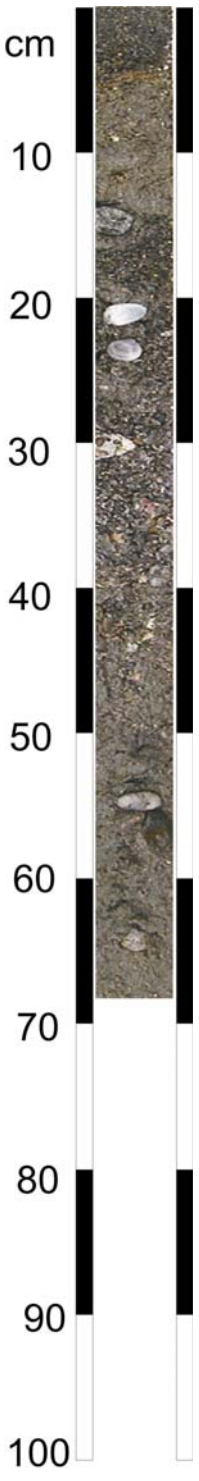
TESTEMUNHO 06



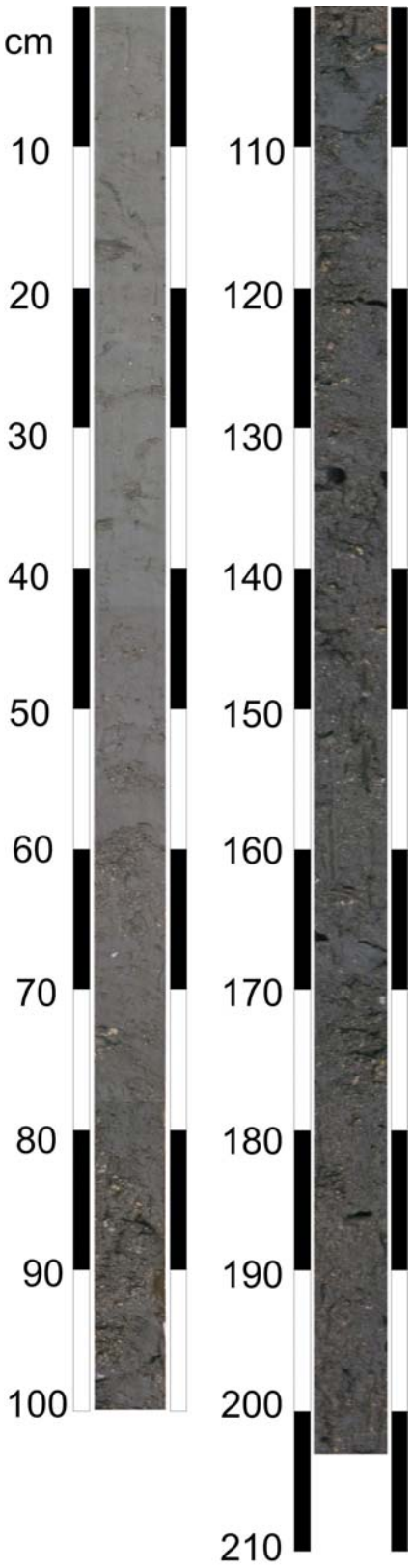
TESTEMUNHO 07



TESTEMUNHO 08



TESTEMUNHO 09



APÊNDICE III – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Esta análise foi realizada tendo como base o método de peneiramento, para sedimentos grossos, e no processo indireto de sedimentação e separação por pipetagem, para os sedimentos finos; ambos descritos por Suguio (1973). A classificação dos sedimentos marinhos foi baseada no conjunto de três métodos tradicionais. O primeiro método segue a escala granulométrica de Wentworth (Tabela III), que classifica o sedimento de acordo com o tamanho do grão (Krumbein e Pettijohn, 1988). O segundo, que classifica os sedimentos no que diz respeito aos teores de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), fundamenta-se na tabela de Larsonneur (Dias, 1996). As frações granulométricas dominantes e os teores de lama foram classificados utilizando o diagrama triangular de Shepard (1954), onde são utilizadas proporções relativas de cascalho, areia e lama (Fig. 23A).

Amostras de sedimentos foram coletadas ao longo dos testemunhos, em distâncias que variaram de 5 a 10 cm. Nas seções onde foram registradas alterações significativas no perfil sônico, ou nas posições onde visualmente havia uma interface de sedimentos, o espaçamento adotado para coleta da amostra foi de 5 cm. Nas demais posições, onde a descrição sedimentológica indicou uniformidade do material (pacotes de areias finas e lamas) o espaçamento foi de 10 cm. O peso de cada amostra variou de 26 a 50 g.

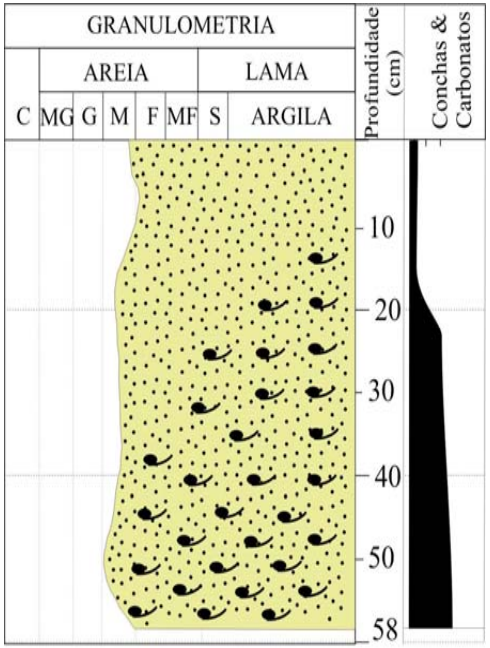
A análise granulométrica de cada testemunho está sendo apresentada neste apêndice por tabelas, por histogramas e por gráficos com perfis verticais (Figs. 24B, 26B, 28B, 30B, 32B, 34B, 36B, 38B e 40B). Nas tabelas, as seções ao longo dos testemunhos, onde foram coletadas as amostras de sedimento, são indicadas no topo em vermelho. O peso fracionado da amostra é descrito na coluna à esquerda em azul, com o peso total indicado na base desta coluna, em preto (negrito). A coluna à direita, em preto, calcula a porcentagem representativa de cada peso fracionado, em relação ao peso total da amostra. Este valor da porcentagem serve de subsídio para a construção dos histogramas, que por sua vez fornecem o dado necessário para a classificação do sedimento e para a elaboração dos perfis verticais. Na coluna “fração” da tabela, são mostrados os valores que representam cada tipo de sedimento, de acordo com a escala granulométrica de Wentworth (Tabela III), sendo que a célula onde está escrito “fundo” representa os sedimentos finos: argilas e siltes, associados no contexto deste trabalho às lamas.

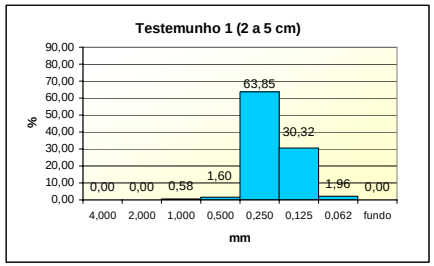
Testemunho 1 – Tabelas com o peso e a porcentagem representativa de cada tipo de sedimento, medidos ao longo das seções do testemunho

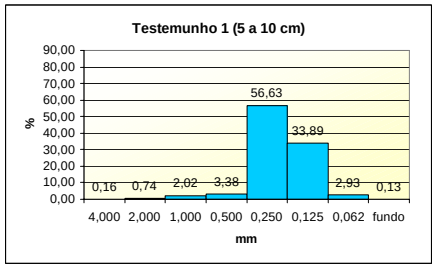
Seção 2 a 5 cm		Seção 5 a 10 cm		Seção 10 a 15 cm		Seção 15 a 20 cm		Seção 23 a 27 cm		Seção 28 a 33 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**		**%**	**Peso**	**%**		**%**	**mm**
0	0,00	0,076	0,16	0,386	0,82	3,558	7,75	3,177	6,56	4,315	8,98	**4.000**
0	0,00	0,362	0,74	0,861	1,82	1,603	3,49	2,45	5,06	2,885	6,00	**2.000**
0,294	0,58	0,983	2,02	1,462	3,09	1,967	4,28	2,953	6,10	2,665	5,55	**1.000**
0,815	1,60	1,648	3,38	1,792	3,79	2,188	4,77	2,73	5,64	2,545	5,30	**0,500**
32,577	63,85	27,58	56,63	29,15	61,63	24,555	53,48	25,529	52,70	25,513	53,10	**0,250**
15,468	30,32	16,505	33,89	13,002	27,49	11,666	25,41	11,257	23,24	9,755	20,30	**0,125**
1	1,96	1,425	2,93	0,571	1,21	0,329	0,72	0,306	0,63	0,336	0,70	**0,062**
0	0,00	0,061	0,13	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	**fundo**
Total: 51,02	100 %	**Total: 48,70**	100 %	**Total: 47,29**	100 %	**Total: 45,91**	100 %	**Total: 48,43**	100 %	**Total: 48,04**	100 %	

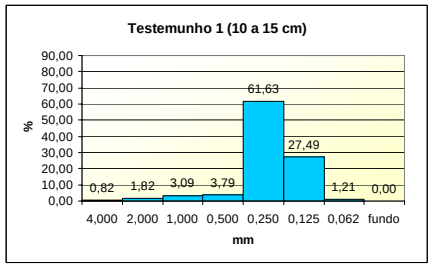
Seção 35 a 39 cm		Seção 44 a 48 cm		Seção 49 a 53 cm		Seção 55 a 59 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
5,482	11,55	5,184	10,92	5,111	10,58	3,277	6,49	**4.000**
3,559	7,50	4,709	9,92	5,214	10,79	4,555	9,03	**2.000**
3,579	7,54	3,986	8,40	4,797	9,93	3,988	7,90	**1.000**
2,689	5,67	3,092	6,52	3,261	6,75	3,526	6,99	**0,500**
23,092	48,65	23,289	49,07	21,949	45,42	25,262	50,07	**0,250**
8,761	18,46	6,867	14,47	7,717	15,97	9,503	18,83	**0,125**
0,243	0,51	0,247	0,52	0,252	0,52	0,293	0,58	**0,062**
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	**fundo**
Total: 47,46	100 %	**Total: 47,45**	100 %	**Total: 48,32**	100 %	**Total: 50,45**	100 %	

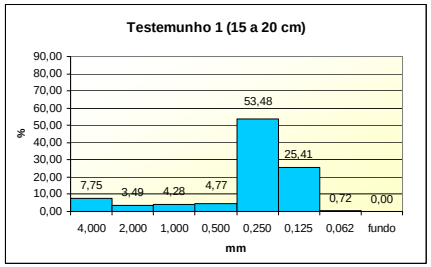
Testemunho 1 – Histogramas representativos das porcentagens medidas para cada tipo de sedimento

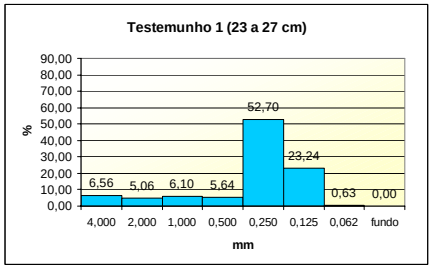


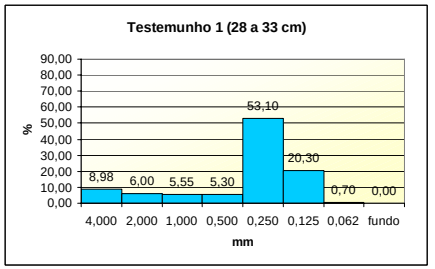


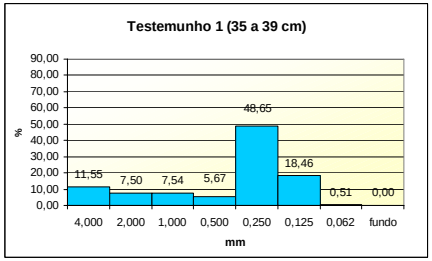


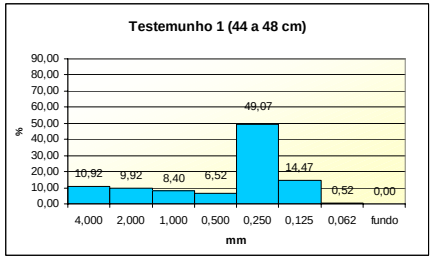


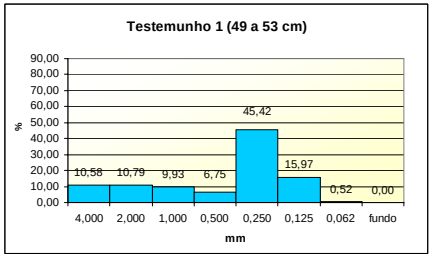


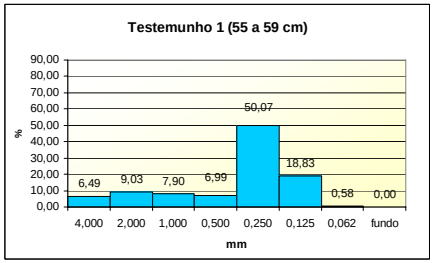










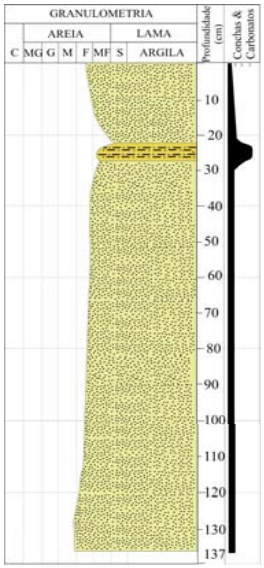


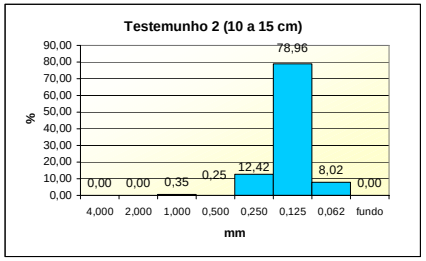
Testemunho 2 – Tabelas com o peso e a porcentagem representativa de cada tipo de sedimento, medidos ao longo das seções do testemunho

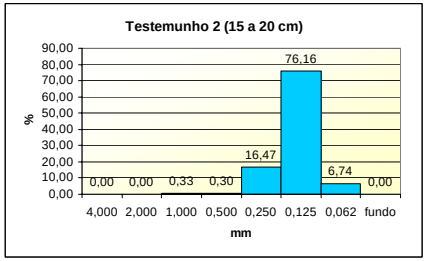
Seção 10 a 15 cm		Seção 15 a 20 cm		Seção 20 a 25 cm		Seção 20 a 27 cm		Seção 30 a 35 cm		Seção 32 a 38 cm		Seção 45 a 50 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
0	0,00	0	0,00	1,381	2,90	0,256	0,56	0	0,00	0	0,00	0,502	1,08	**4.000**
0	0,00	0	0,00	0,84	1,76	0,417	0,92	0	0,00	0	0,00	0,043	0,09	**2.000**
0,153	0,35	0,148	0,33	0,353	0,74	0,164	0,36	0,121	0,25	0,074	0,16	0,07	0,15	**1.000**
0,11	0,25	0,134	0,30	0,337	0,71	0,224	0,49	0,113	0,24	0,06	0,13	0,085	0,18	**0,500**
5,437	12,42	7,322	16,47	6,878	14,43	3,402	7,47	3,772	7,94	1,65	3,54	2,612	5,63	**0,250**
34,577	78,96	33,867	76,16	22,629	47,48	26,442	58,06	38,19	80,42	38,569	82,84	38,77	83,59	**0,125**
3,511	8,02	2,995	6,74	1,689	3,54	2,496	5,48	3,939	8,29	5,138	11,04	3,465	7,47	**0,062**
0	0,00	0	0,00	13,557	28,44	12,141	26,66	0	0,00	0	0,00	0	0,00	**fundo**
Total: 43,78	100 %	**Total: 44,46**	100 %	**Total: 47,66**	100 %	**Total: 45,54**	100 %	**Total: 47,48**	100 %	**Total: 46,55**	100 %	**Total: 46,38**	100 %	

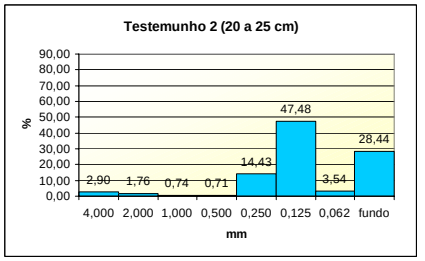
Seção 58 a 63 cm		Seção 70 a 75 cm		Seção 80 a 87 cm		Seção 90 a 95 cm		Seção 110 a 115 cm		Seção 120 a 128 cm		Seção 135 a 139 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0,081	0,16	0	0,00	**4.000**
0	0,00	0,076	0,16	0	0,00	0,05	0,10	0	0,00	0,174	0,35	0,25	0,56	**2.000**
0,195	0,42	0,042	0,09	0,18	0,38	0,054	0,11	0,149	0,30	0,805	1,63	0,669	1,49	**1.000**
0,204	0,44	0,079	0,17	0,111	0,24	0,072	0,15	0,09	0,18	0,469	0,95	0,966	2,15	**0,500**
2,204	4,72	1,984	4,23	2,994	6,40	2,048	4,19	3,079	6,28	1,995	4,04	5,653	12,56	**0,250**
40,975	87,80	38,647	82,42	40,968	87,52	40,374	82,52	38,118	77,70	32,208	65,26	24,905	55,33	**0,125**
3,042	6,52	4,051	8,64	2,598	5,55	5,358	10,95	5,278	10,76	3,33	6,75	1,981	4,40	**0,062**
0,141	0,30	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1,854	4,12	**fundo**
Total: 46,66	100 %	**Total: 46,89**	100 %	**Total: 46,81**	100 %	**Total: 48,92**	100 %	**Total: 49,05**	100 %	**Total: 49,35**	100 %	**Total: 45,00**	100 %	

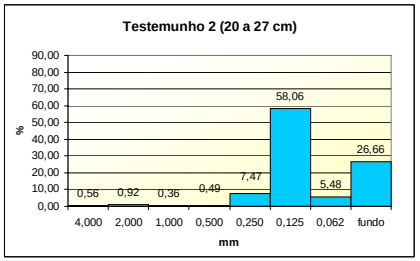
Testemunho 2 – Histogramas representativos das porcentagens medidas para cada tipo de sedimento

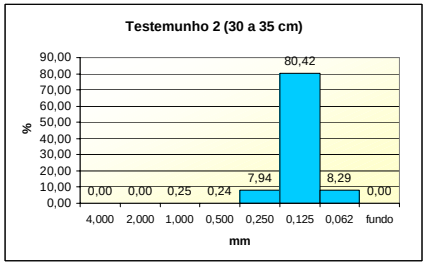


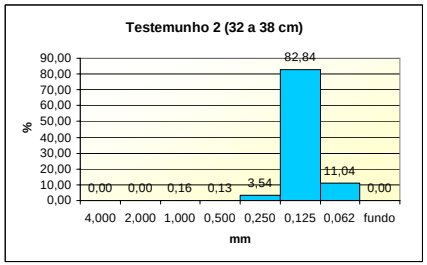


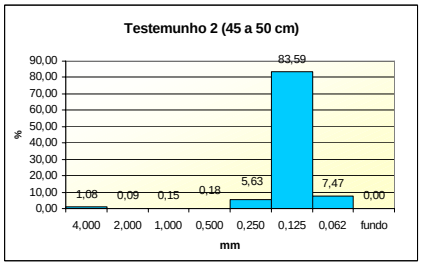


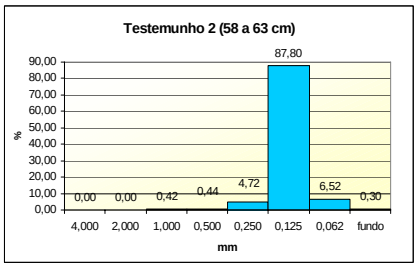


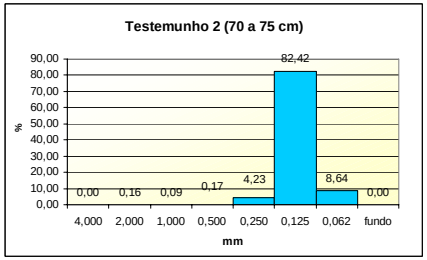


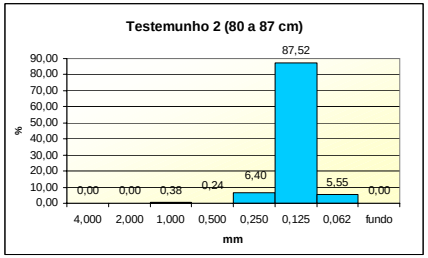


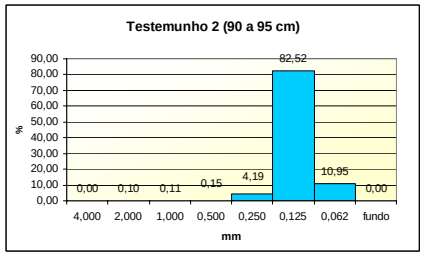


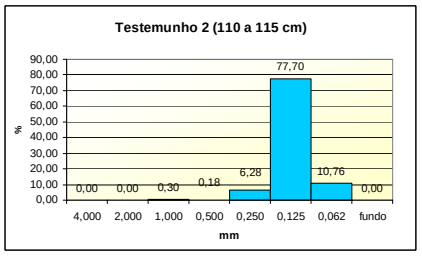


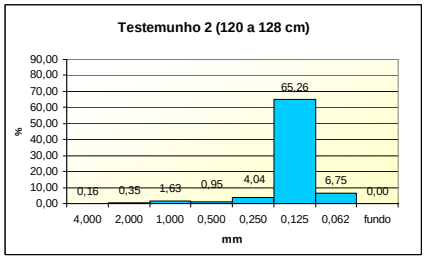


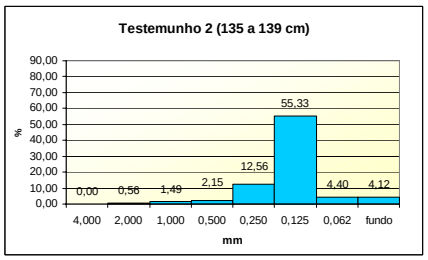










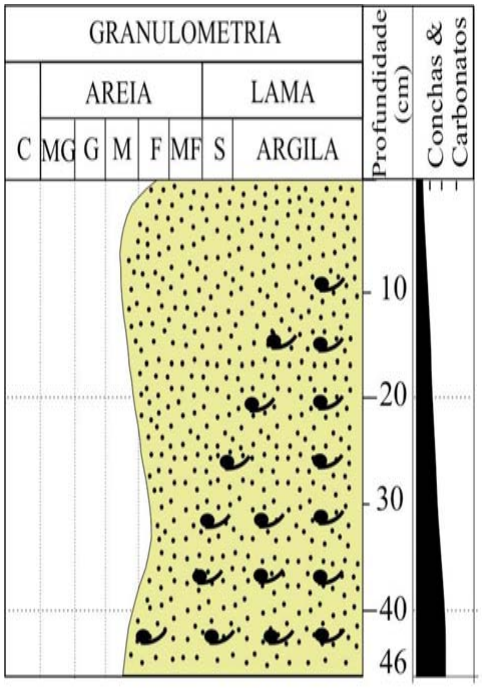


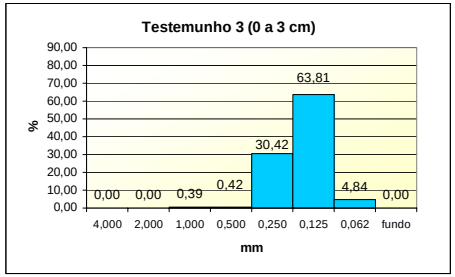
Testemunho 3 – Tabelas com o peso e a porcentagem representativa de cada tipo de sedimento, medidos ao longo das seções do testemunho

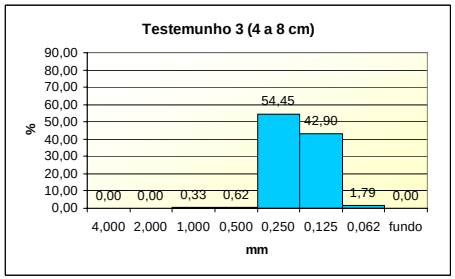
Seção 0 a 3 cm		Seção 4 a 8 cm		Seção 8 a 15 cm		Seção 15 a 22 cm		Seção 22 a 26 cm		Seção 28 a 31 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	**4.000**
0	0,00	0	0,00	0,058	0,11	0,236	0,41	0,346	0,68	0,172	0,35	**2.000**
0,191	0,39	0,16	0,33	0,221	0,43	0,499	0,86	0,575	1,14	0,602	1,22	**1.000**
0,203	0,42	0,303	0,62	0,395	0,77	0,649	1,12	0,686	1,36	0,521	1,05	**0,500**
14,799	30,42	26,667	54,45	23,43	45,89	28,065	48,25	29,628	58,62	21,962	44,41	**0,250**
31,04	63,81	21,011	42,90	25,82	50,57	27,688	47,60	18,534	36,67	25,047	50,65	**0,125**
2,354	4,84	0,875	1,79	1,112	2,18	1,032	1,77	0,792	1,57	1,129	2,28	**0,062**
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	**fundo**
Total: 48,64	100 %	**Total: 48,97**	100 %	**Total: 51,05**	100 %	**Total: 58,16**	100 %	**Total: 50,54**	100 %	**Total: 49,45**	100 %	

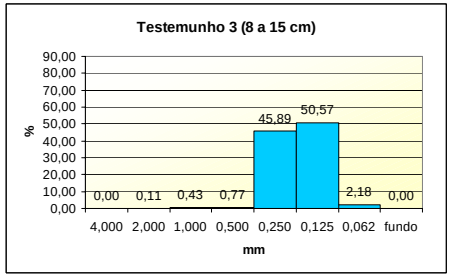
Seção 33 a 36 cm		Seção 37 a 40 cm		Seção 43 a 46 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
0	0,00	0,264	0,53	3,034	6,30	**4.000**
0	0,00	1,489	2,99	3,075	6,39	**2.000**
1,208	2,38	1,265	2,54	1,01	2,10	**1.000**
0,601	1,18	0,677	1,36	0,528	1,10	**0,500**
29,74	58,48	22,629	45,51	22,66	47,07	**0,250**
18,453	36,28	22,408	45,06	16,617	34,52	**0,125**
0,857	1,69	0,996	2,00	1,108	2,30	**0,062**
0	0,00	0	0,00	0	0,00	**fundo**
Total: 50,85	100 %	**Total: 49,72**	100 %	**Total: 48,14**	100 %	

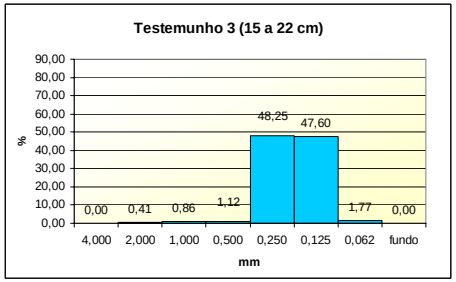
Testemunho 3 – Histogramas representativos das porcentagens medidas para cada tipo de sedimento

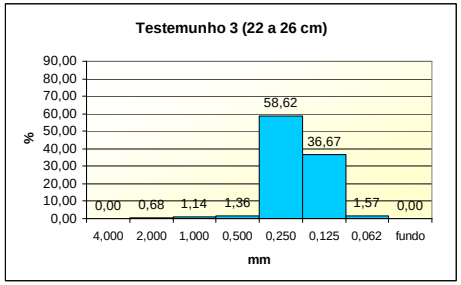


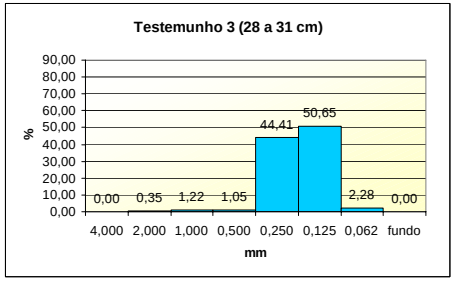


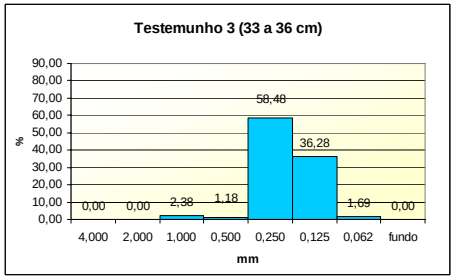


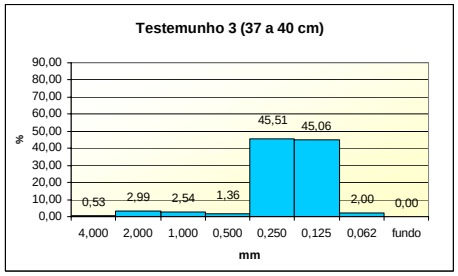


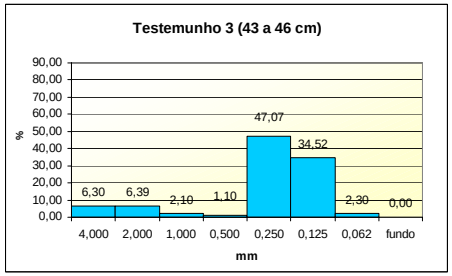










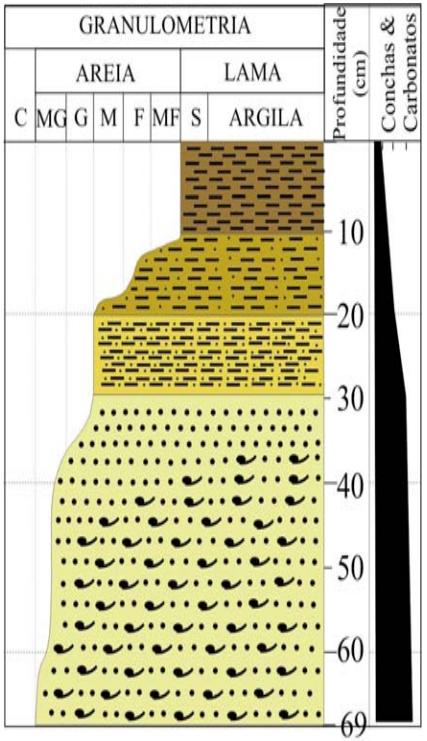


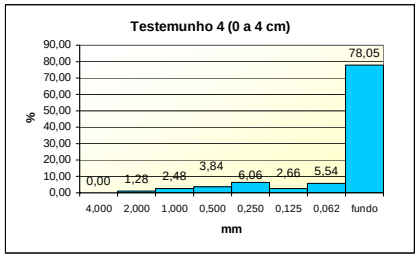
Testemunho 4 – Tabelas com o peso e a porcentagem representativa de cada tipo de sedimento, medidos ao longo das seções do testemunho

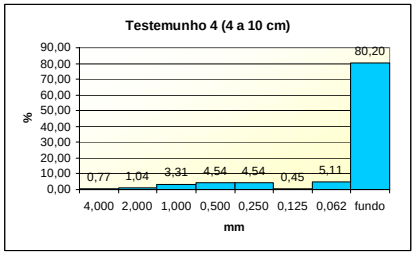
Seção 0 a 4 cm		Seção 4 a 10 cm		Seção 10 a 14 cm		Seção 14 a 24 cm		Seção 20 a 25 cm		Seção 28 a 33 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
0	0,00	0,265	0,77	1,001	2,75	0,502	1,06	1,767	3,55	0	0,00	**4.000**
0,333	1,28	0,359	1,04	0,902	2,48	1,721	3,64	0,785	1,58	0,127	0,28	**2.000**
0,648	2,48	1,139	3,31	2,121	5,83	4,194	8,87	2,723	5,47	3,345	7,50	**1.000**
1,002	3,84	1,561	4,54	2,253	6,19	6,022	12,73	6,108	12,27	17,483	39,20	**0,500**
1,58	6,06	1,561	4,54	3,58	9,84	3,307	6,99	22,037	44,26	20,449	45,85	**0,250**
0,694	2,66	0,156	0,45	1,29	3,54	2,865	6,06	7,964	16,00	1,948	4,37	**0,125**
1,446	5,54	1,757	5,11	4,696	12,90	3,603	7,62	4,026	8,09	1,031	2,31	**0,062**
20,367	78,05	27,588	80,20	20,54	56,43	25,054	52,96	4,285	8,61	0,216	0,48	**fundo**
Total: 26,09	100 %	**Total: 34,39**	100 %	**Total: 36,39**	100 %	**Total: 47,30**	100 %	**Total: 49,78**	100 %	**Total: 44,59**	100 %	

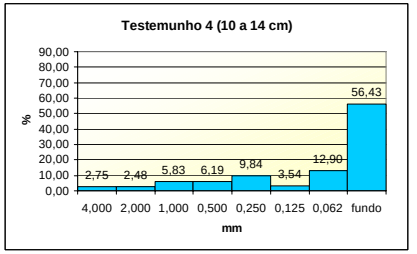
Seção 35 a 40 cm		Seção 42 a 47 cm		Seção 50 a 55 cm		Seção 55 a 60 cm		Seção 62 a 68 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
1,163	2,52	0	0,00	0,433	0,98	2,109	4,69	0,201	0,44	**4.000**
1,765	3,82	2,029	4,46	3,592	8,09	4,662	10,37	8,387	18,50	**2.000**
12,999	28,12	17,651	38,76	19,007	42,81	16,299	36,25	21,838	48,16	**1.000**
16,682	36,09	16,163	35,49	12,891	29,03	10,869	24,17	8,909	19,65	**0,500**
10,702	23,15	6,968	15,30	5,542	12,48	7,503	16,69	3,614	7,97	**0,250**
1,154	2,50	0,746	1,64	0,704	1,59	1,425	3,17	0,512	1,13	**0,125**
1,363	2,95	0,599	1,32	0,697	1,57	1,702	3,79	0,552	1,22	**0,062**
0,333	0,72	1,384	3,04	1,532	3,45	0,382	0,85	1,337	2,95	**fundo**
Total: 46,22	100 %	**Total: 45,54**	100 %	**Total: 44,39**	100 %	**Total: 44,96**	100 %	**Total: 45,34**	100 %	

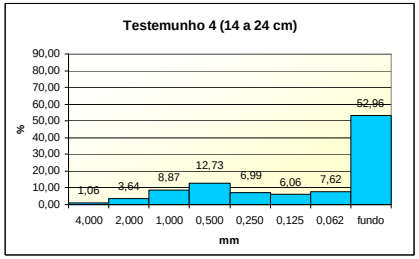
Testemunho 4 – Histogramas representativos das porcentagens medidas para cada tipo de sedimento

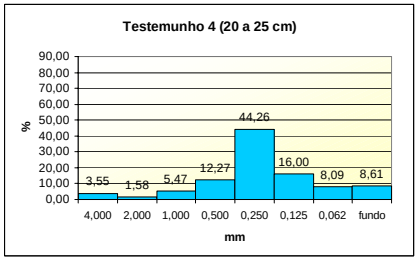


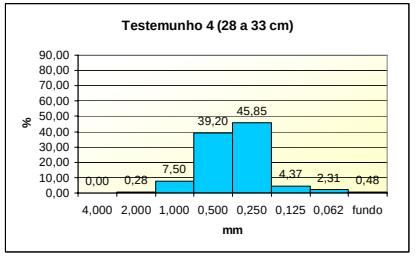


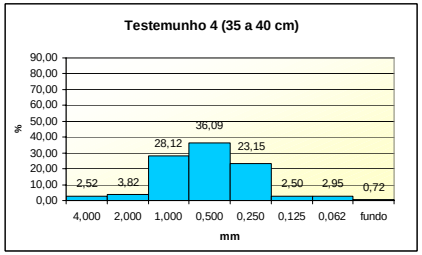


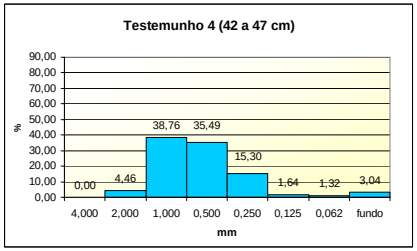


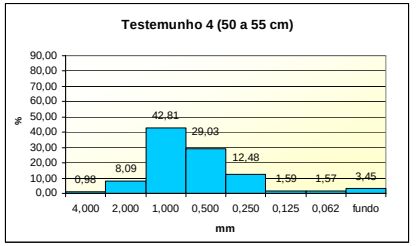


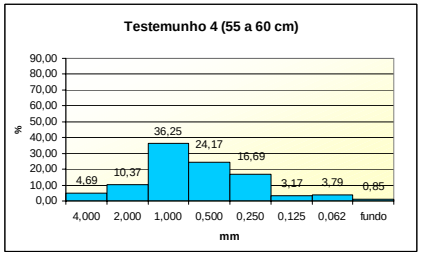


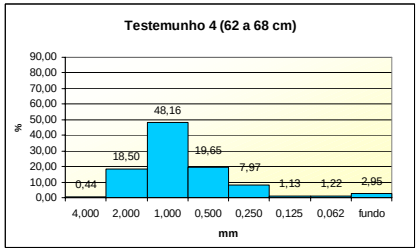










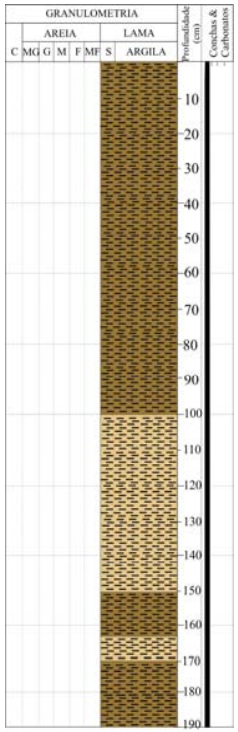


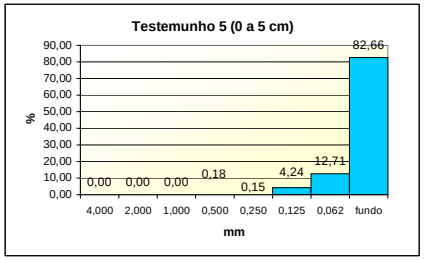
Testemunho 5 – Tabelas com o peso e a porcentagem representativa de cada tipo de sedimento, medidos ao longo das seções do testemunho

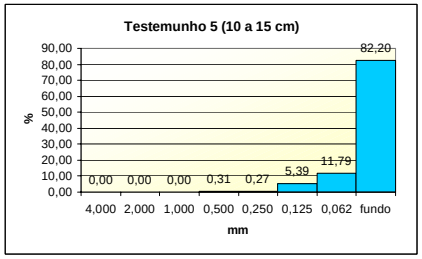
Seção 0 a 5 cm		Seção 10 a 15 cm		Seção 20 a 25 cm		Seção 30 a 35 cm		Seção 50 a 55 cm		Seção 60 a 65 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	**4.000**
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	**2.000**
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0,119	0,33	0	0,00	**1.000**
0,062	0,18	0,102	0,31	0	0,00	0,173	0,49	0,11	0,30	0,178	0,56	**0,500**
0,05	0,15	0,091	0,27	0	0,00	0,13	0,37	0,127	0,35	0,086	0,27	**0,250**
1,436	4,24	1,79	5,39	1,266	4,55	2,317	6,54	2,127	5,85	1,907	6,05	**0,125**
4,31	12,71	3,912	11,79	3,572	12,84	5,397	15,24	4,945	13,60	3,073	9,75	**0,062**
28,021	82,66	27,284	82,20	22,813	82,01	27,358	77,26	28,922	79,52	26,259	83,32	**fundo**
Total: 33,89	100 %	**Total: 33,19**	100 %	**Total: 27,81**	100 %	**Total: 35,40**	100 %	**Total: 36,37**	100 %	**Total: 31,51**	100 %	

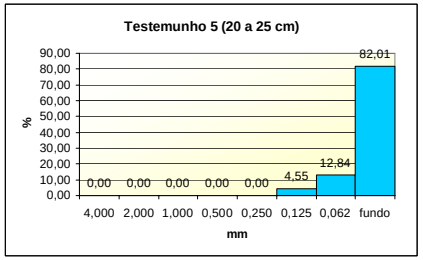
Seção 80 a 85 cm		Seção 100 a 105 cm		Seção 110 a 115 cm		Seção 140 a 145 cm		Seção 160 a 165 cm		Seção 180 a 185 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
0	0,00	0	0,00	0,275	0,90	0,42	1,37	0	0,00	0,344	1,07	**4.000**
0,282	0,82	0,214	0,68	0,242	0,79	0,21	0,69	0,23	0,85	0,363	1,13	**2.000**
0,111	0,32	0,193	0,61	0,127	0,41	0,101	0,33	0,123	0,46	0,13	0,40	**1.000**
0,107	0,31	0,146	0,46	0,141	0,46	0,104	0,34	0,122	0,45	0,131	0,41	**0,500**
0,123	0,36	0,114	0,36	0,149	0,49	0,111	0,36	0,106	0,39	0,116	0,36	**0,250**
2,053	5,98	2,022	6,43	1,979	6,45	1,708	5,58	1,615	5,98	1,79	5,55	**0,125**
4,135	12,04	3,269	10,40	2,731	8,91	3,04	9,93	2,092	7,74	4,725	14,66	**0,062**
27,843	81,06	25,469	81,03	25,034	81,65	24,893	81,35	22,735	84,13	24,629	76,41	**fundo**
Total: 34,34	100 %	**Total: 31,43**	100 %	**Total: 30,66**	100 %	**Total: 30,59**	100 %	**Total: 27,02**	100 %	**Total: 32,23**	100 %	

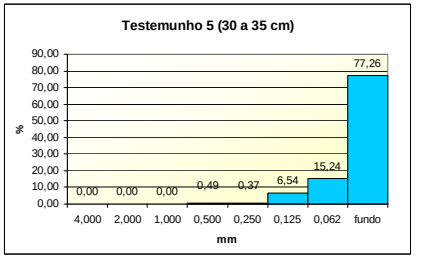
Testemunho 5 – Histogramas representativos das porcentagens medidas para cada tipo de sedimento

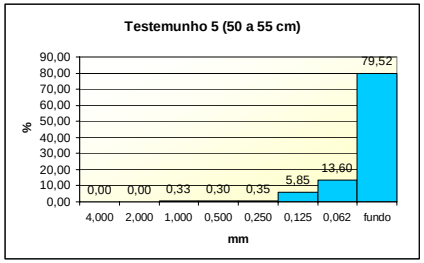


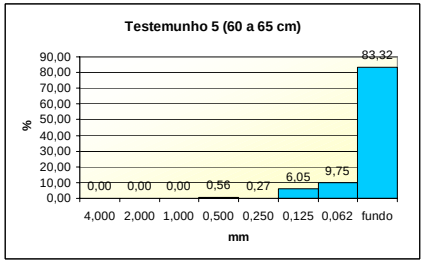


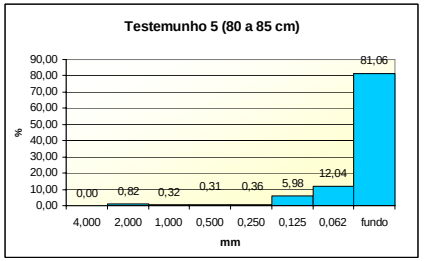


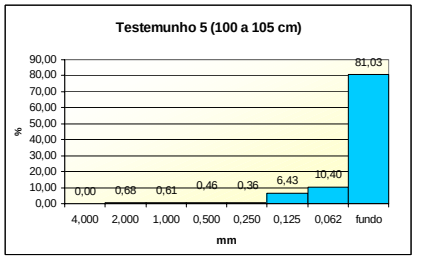


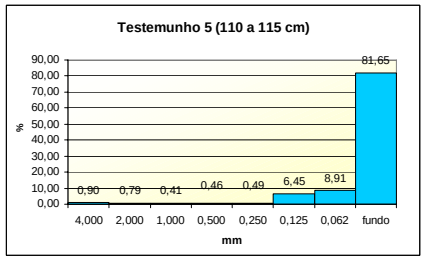


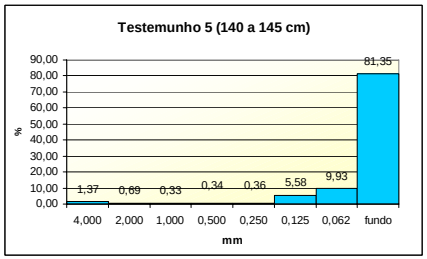


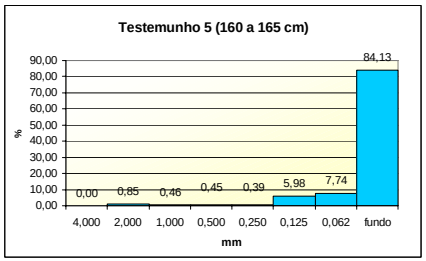


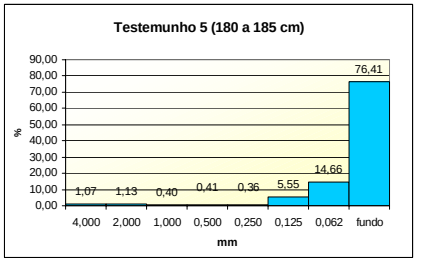










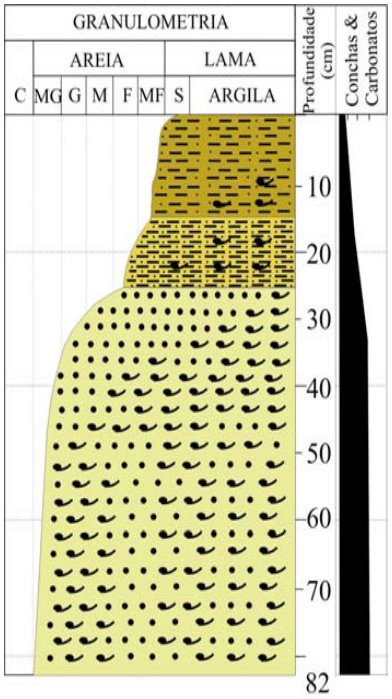


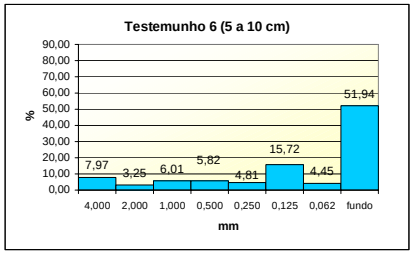
Testemunho 6 – Tabelas com o peso e a porcentagem representativa de cada tipo de sedimento, medidos ao longo das seções do testemunho

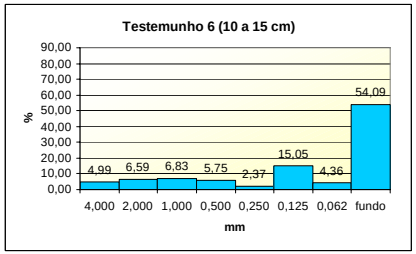
Seção 5 a 10 cm		Seção 10 a 15 cm		Seção15 a 20 cm		Seção 23 a 28 cm		Seção 30 a 35 cm		Seção 36 a 41 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
3,432	7,97	2,108	4,99	2,509	5,05	7,141	14,67	5,849	11,10	0,343	0,67	**4.000**
1,401	3,25	2,783	6,59	5,932	11,95	6,569	13,49	5,921	11,24	6,425	12,63	**2.000**
2,591	6,01	2,884	6,83	4,636	9,34	4,329	8,89	10,429	19,80	25,42	49,97	**1.000**
2,507	5,82	2,426	5,75	9,641	19,42	9,25	19,00	13,859	26,31	12,088	23,76	**0,500**
2,072	4,81	1,002	2,37	5,444	10,97	4,465	9,17	6,934	13,16	6,034	11,86	**0,250**
6,773	15,72	6,353	15,05	4,927	9,93	3,505	7,20	4,268	8,10	0,417	0,82	**0,125**
1,918	4,45	1,842	4,36	1,438	2,90	1,191	2,45	1,173	2,23	0,136	0,27	**0,062**
22,376	51,94	22,834	54,09	15,111	30,44	12,233	25,13	4,244	8,06	0	0,00	**fundo**
Total: 43,07	100 %	**Total: 42,21**	100 %	**Total: 49,63**	100 %	**Total: 48,68**	100 %	**Total: 52,67**	100 %	**Total: 50,87**	100 %	

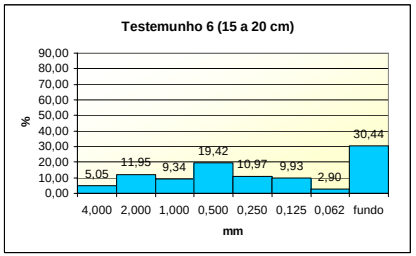
Seção 50 a 55 cm		Seção 58 a 63 cm		Seção 72 a 76 cm		Seção 80 a 83 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
1,741	3,37	0,238	0,46	4,288	8,61	6,288	12,36	**4.000**
12,91	24,97	3,772	7,28	11,042	22,18	11,37	22,35	**2.000**
15,058	29,12	20,763	40,09	16,722	33,59	14,617	28,74	**1.000**
13,9	26,88	23,059	44,52	14,589	29,31	14,974	29,44	**0,500**
6,608	12,78	3,785	7,31	3	6,03	3,517	6,91	**0,250**
1,096	2,12	0,117	0,23	0,085	0,17	0,087	0,17	**0,125**
0,322	0,62	0,027	0,05	0	0,00	0	0,00	**0,062**
0,071	0,14	0	0,00	0	0,00	0	0,00	**fundo**
Total: 51,70	100 %	**Total: 51,79**	100 %	**Total: 49,77**	100 %	**Total: 50,86**	100 %	

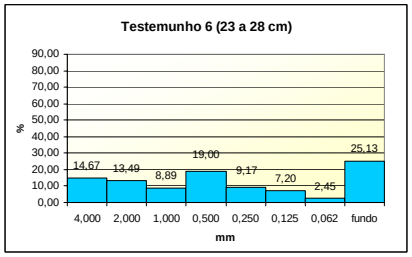
Testemunho 6 – Histogramas representativos das porcentagens medidas para cada tipo de sedimento

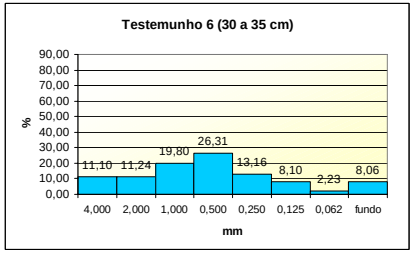


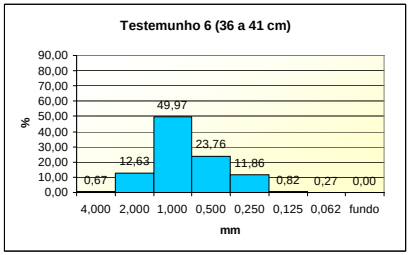


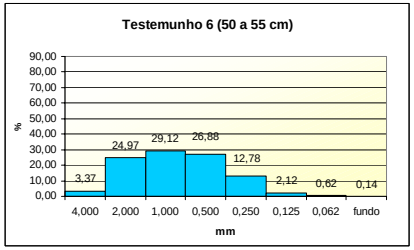


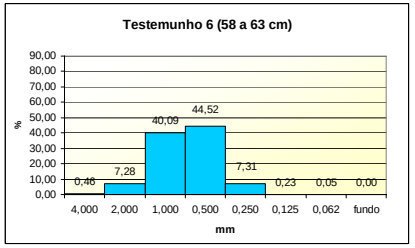


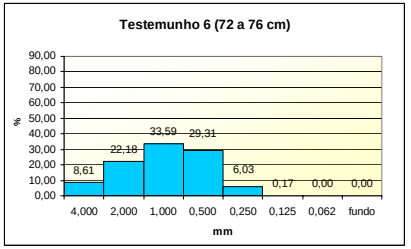


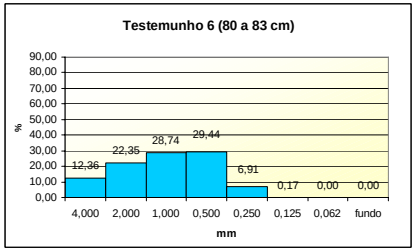










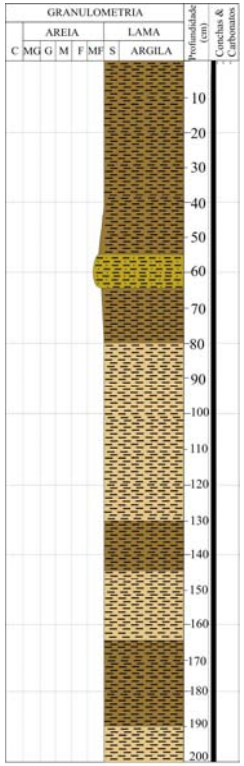


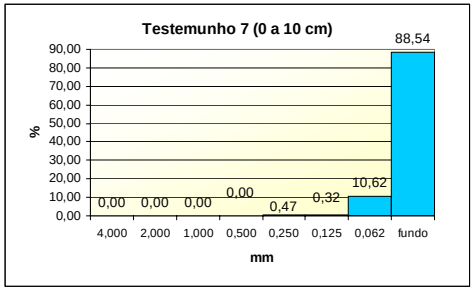
Testemunho 7 – Tabelas com o peso e a porcentagem representativa de cada tipo de sedimento, medidos ao longo das seções do testemunho

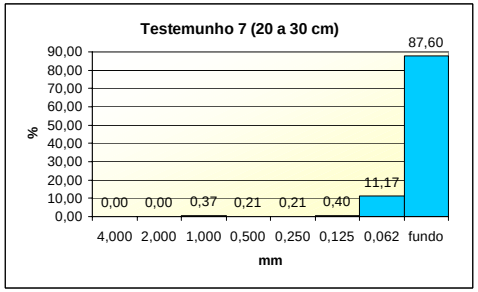
Seção 0 a 10 cm		Seção 20 a 30 cm		Seção 40 a 50 cm		Seção 50 a 55 cm		Seção 55 a 63 cm		Seção 58 a 64 cm		Seção 63 a 70 cm		
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**fração**
0	0,00	0	0,00	0,237	0,68	0	0,00	0,108	0,27	0,692	1,71	0	0,00	**4.000**
0	0,00	0	0,00	0,155	0,45	0	0,00	0,214	0,53	0,591	1,46	0	0,00	**2.000**
0	0,00	0,122	0,37	0,192	0,55	0,255	0,76	0,197	0,49	0,351	0,87	0,171	0,45	**1.000**
0	0,00	0,069	0,21	0,164	0,47	0,131	0,39	0,201	0,50	0,294	0,73	0,123	0,33	**0,500**
0,14	0,47	0,07	0,21	0,156	0,45	0,132	0,39	0,159	0,40	0,273	0,67	0,149	0,40	**0,250**
0,096	0,32	0,133	0,40	0,254	0,73	0,231	0,69	0,261	0,65	0,359	0,89	0,264	0,70	**0,125**
3,185	10,62	3,719	11,17	5,02	14,46	6,199	18,55	8,62	21,48	10,356	25,56	7,852	20,85	**0,062**
26,548	88,54	29,17	87,60	28,605	82,37	26,468	79,19	30,359	75,64	27,599	68,11	29,087	77,22	**fundo**
Total: 29,98	100 %	**Total: 33,3**	100 %	**Total: 34,72**	100 %	**Total: 33,42**	100 %	**Total: 40,13**	100 %	**Total: 40,51**	100 %	**Total: 37,66**	100 %	

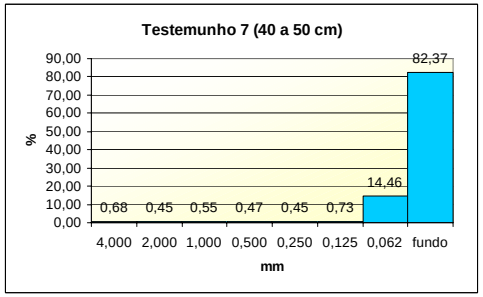
Seção 70 a 80 cm		Seção 90 a 100 cm		Seção 110 a 120 cm		Seção 130 a 140 cm		Seção 150 a 160 cm		Seção 170 a 180 cm		Seção 190 a 200 cm		
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**fração**
0,196	0,58	0	0,00	0,214	0,60	0	0,00	0	0,00	0,115	0,35	0	0,00	**4.000**
0,112	0,33	0	0,00	0,088	0,25	0,221	0,64	0,112	0,37	0,144	0,44	0,111	0,34	**2.000**
0,115	0,34	0,195	0,59	0,107	0,30	0,156	0,45	0,131	0,43	0,119	0,36	0,136	0,42	**1.000**
0,116	0,34	0,112	0,34	0,13	0,37	0,112	0,33	0,099	0,32	0,121	0,37	0,116	0,36	**0,500**
0,111	0,33	0,107	0,33	0,12	0,34	0,127	0,37	0,12	0,39	0,124	0,37	0,107	0,33	**0,250**
0,224	0,66	0,177	0,54	0,215	0,61	0,238	0,69	0,217	0,71	0,249	0,75	0,187	0,58	**0,125**
4,708	13,90	4,366	13,26	4,805	13,58	4,974	14,48	4,067	13,30	5,08	15,36	4,309	13,39	**0,062**
28,271	83,48	27,974	84,99	29,72	84,02	28,566	83,16	25,831	84,45	27,111	81,99	27,188	84,49	**fundo**
Total: 33,86	100 %	**Total: 32,91**	100 %	**Total: 35,37**	100 %	**Total: 34,34**	100 %	**Total: 30,58**	100 %	**Total: 33,06**	100 %	**Total: 32,17**	100 %	**fundo**

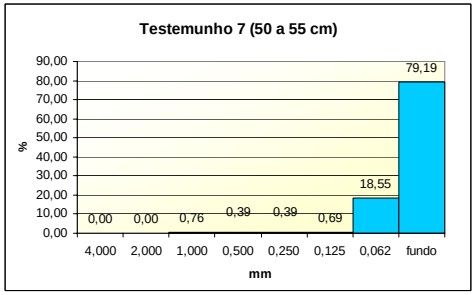
Testemunho 7 – Histogramas representativos das porcentagens medidas para cada tipo de sedimento

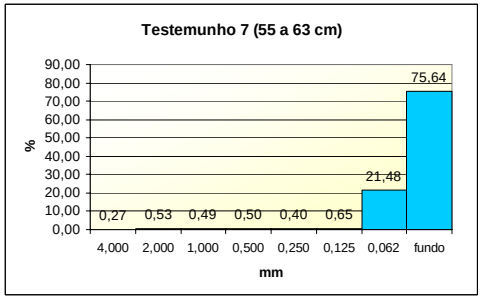


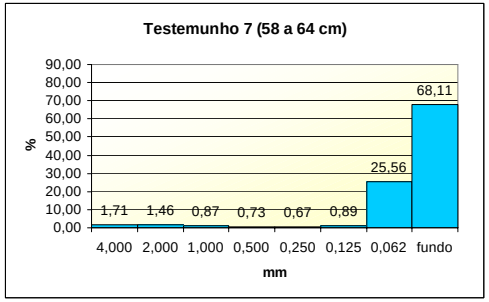


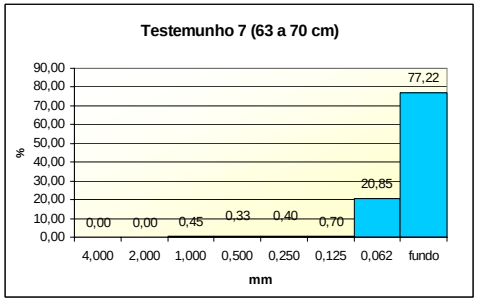


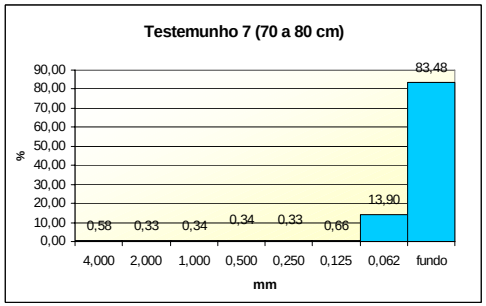


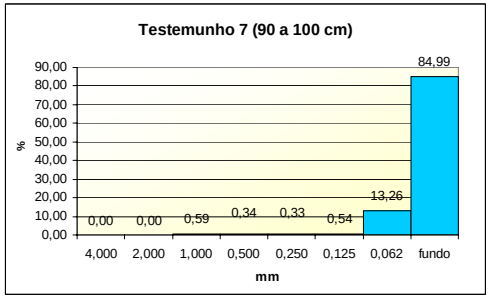




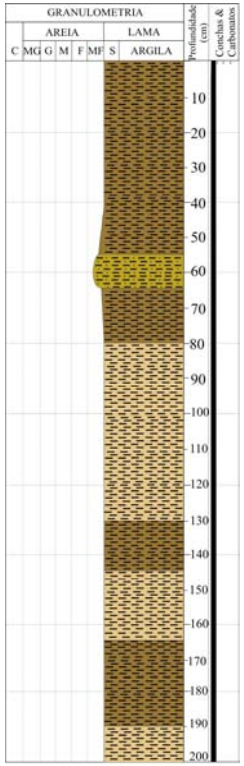


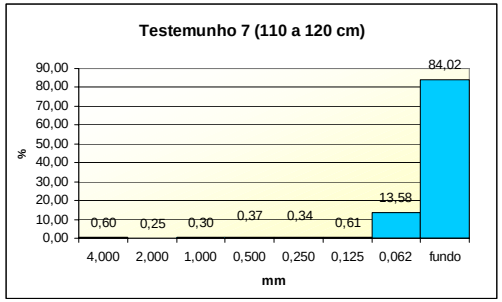


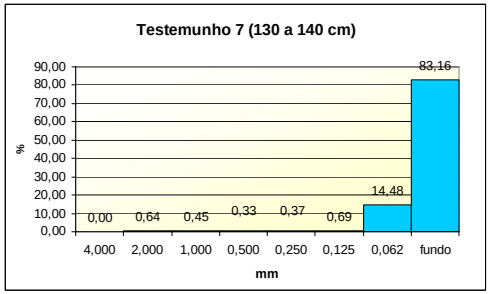


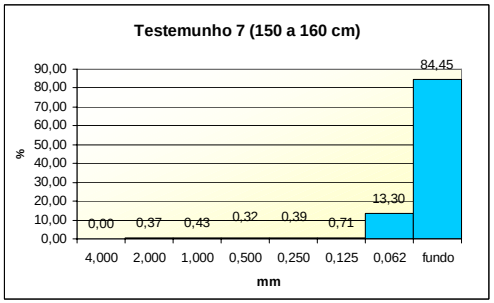


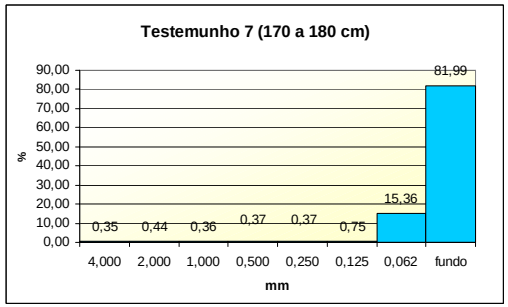
Testemunho 7 – Histogramas representativos das porcentagens medidas para cada tipo de sedimento

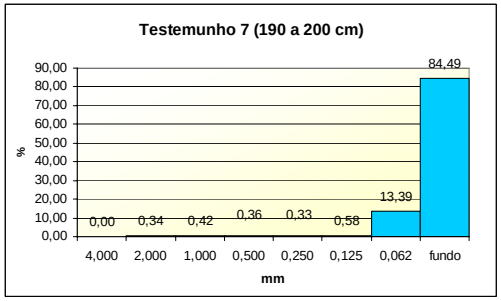










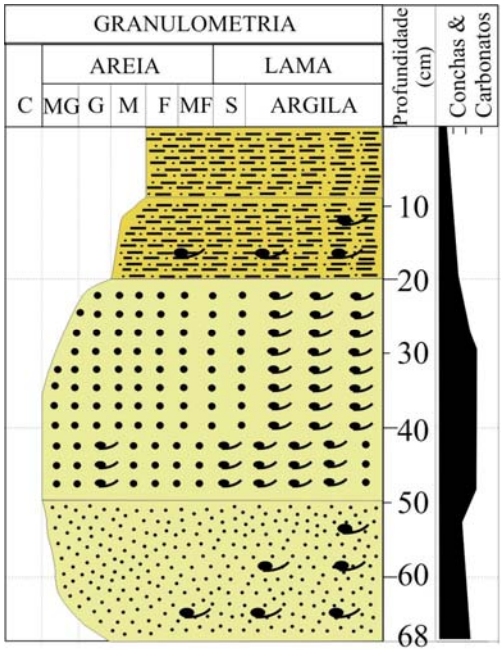


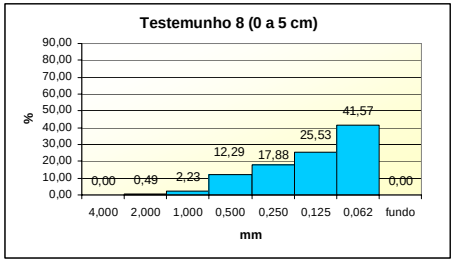
Testemunho 8 – Tabelas com o peso e a porcentagem representativa de cada tipo de sedimento, medidos ao longo das seções do testemunho

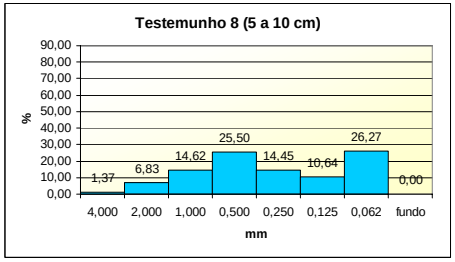
Seção 0 a 5 cm		Seção 5 a 10 cm		Seção 10 a 15 cm		Seção 15 a 20 cm		Seção 20 a 25 cm		Seção 25 a 30 cm		fração
Peso	%	Peso	%	Peso	%	Peso	%	Peso	%	Peso	%	mm
0	0,00	0,123	0,28	0,818	2,10	0,978	2,33	0,541	1,23	3,176	6,86	**4.000**
0	0,00	0,597	1,37	0,673	1,73	1,906	4,54	2,545	5,80	6,145	13,28	**2.000**
0,177	0,49	2,977	6,83	3,838	9,86	4,212	10,03	7,651	17,43	9,667	20,89	**1.000**
0,806	2,23	6,371	14,62	6,209	15,95	8,921	21,25	12,765	29,09	11,39	24,62	**0,500**
4,451	12,29	11,114	25,50	8,99	23,09	8,014	19,09	10,089	22,99	6,942	15,00	**0,250**
6,476	17,88	6,296	14,45	7,049	18,10	4,669	11,12	3,45	7,86	2,765	5,98	**0,125**
9,244	25,53	4,635	10,64	1,075	2,76	1,878	4,47	2,68	6,11	1,964	4,25	**0,062**
15,056	41,57	11,449	26,27	10,297	26,45	11,412	27,19	4,14	9,43	4,248	9,18	**fundo**
Total: 36,21	100 %	**Total: 43,57**	100 %	**Total: 38,93**	100 %	**Total: 41,97**	100 %	**Total: 43,88**	100 %	**Total: 46,26**	100 %	

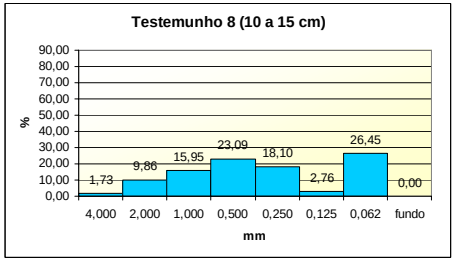
Seção 30 a 35 cm		Seção 40 a 45 cm		Seção 45 a 50 cm		Seção 55 a 60 cm		Seção 60 a 65 cm		fração
Peso	%	Peso	%	Peso	%	Peso	%	Peso	%	mm
6,405	13,67	15,123	30,44	3,822	7,94	0,728	1,67	1,46	3,24	**4.000**
5,931	12,66	11,331	22,81	6,122	12,72	2,934	6,73	3,6	8,00	**2.000**
16,556	35,33	9,202	18,52	7,329	15,23	5,544	12,71	5,363	11,91	**1.000**
10,811	23,07	5,152	10,37	7,122	14,80	6,202	14,22	6,355	14,12	**0,500**
3,297	7,04	3,473	6,99	7,955	16,53	8,882	20,36	8,479	18,84	**0,250**
0,992	2,12	1,52	3,06	4,799	9,97	6,171	14,15	6,548	14,55	**0,125**
0,585	1,25	0,844	1,70	3,379	7,02	3,98	9,12	4,018	8,93	**0,062**
2,299	4,91	3,035	6,11	7,49	15,57	9,168	21,02	9,177	20,39	**fundo**
Total: 46,86	100 %	**Total: 49,68**	100 %	**Total: 48,11**	100 %	**Total: 43,61**	100 %	**Total: 45,01**	100 %	

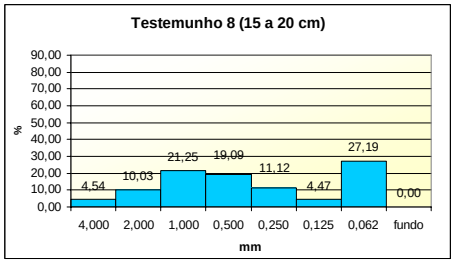
Testemunho 8 – Histogramas representativos das porcentagens medidas para cada tipo de sedimento

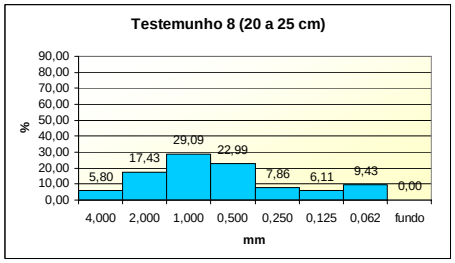


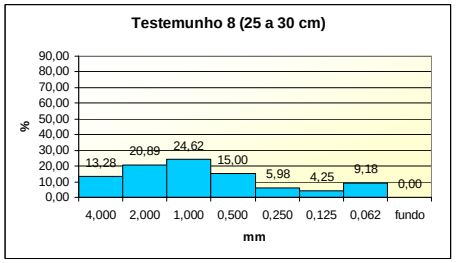


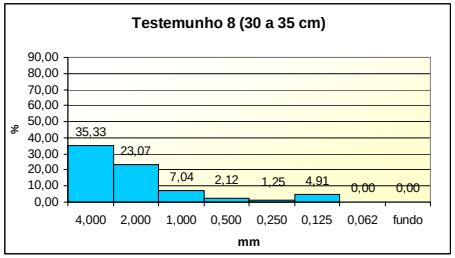


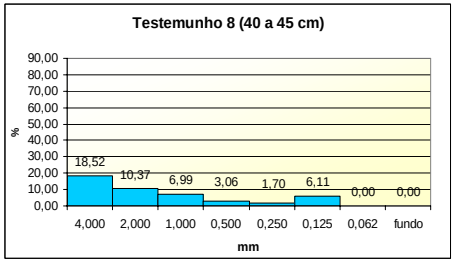


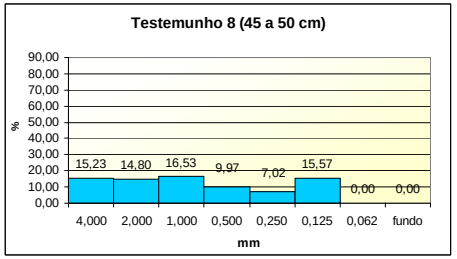


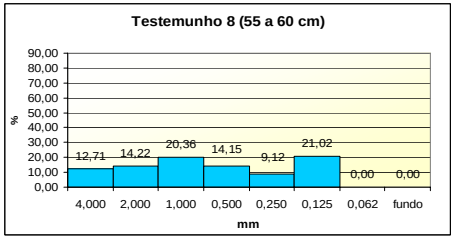


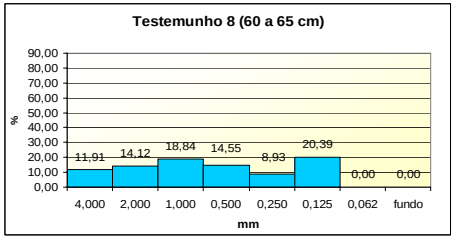












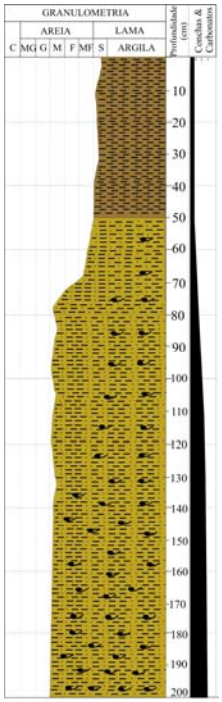
Testemunho 9 – Tabelas com o peso e a porcentagem representativa de cada tipo de sedimento, medidos ao longo das seções do testemunho

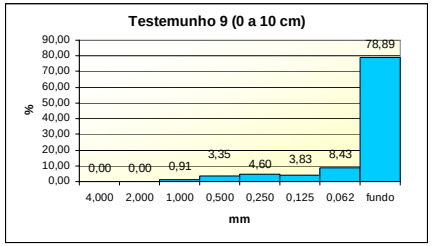
Seção 0 a 10 cm		Seção 10 a 20 cm		Seção 20 a 30 cm		Seção 30 a 40 cm		Seção 40 a 50 cm		Seção 50 a 60 cm		Seção 60 a 70 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	**4.000**
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0,261	0,75	**2.000**
0,237	0,91	0,238	0,82	0,244	0,89	0,557	1,70	0,358	1,13	0,596	2,05	0,947	2,72	**1.000**
0,869	3,35	0,726	2,50	0,656	2,39	1,387	4,23	1,283	4,04	1,83	6,30	3,298	9,48	**0,500**
1,192	4,60	1,868	6,44	1,381	5,03	1,411	4,30	2,781	8,75	3,432	11,81	5,983	17,19	**0,250**
0,993	3,83	0,948	3,27	0,667	2,43	1,404	4,28	1,124	3,54	1,31	4,51	2,413	6,93	**0,125**
2,184	8,43	1,802	6,22	1,462	5,32	2,221	6,77	2,027	6,38	2,003	6,90	1,618	4,65	**0,062**
20,449	78,89	23,405	80,74	23,074	83,98	25,797	78,68	24,196	76,15	19,871	68,41	20,284	58,28	**fundo**
Total: 25,92	100 %	**Total:28,98**	100 %	**Total:27,47**	100 %	**Total:32,78**	100 %	**Total:31,77**	100 %	**Total:29,04**	100 %	**Total:34,80**	100 %	

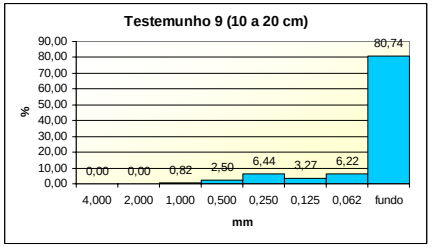
Seção 70 A 80 cm		Seção 80 a 90 cm		Seção 90 a 100 cm		Seção 100 a 110 cm		Seção 110 a 120 cm		Seção 120 a 130 cm		Seção 130 a 140 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
0,24	0,64	0,509	1,32	1,473	3,59	0,173	0,42	0,952	2,41	1,739	3,94	0,827	2,05	**4.000**
0,599	1,59	1,182	3,07	1,553	3,79	1,552	3,75	1,886	4,78	2,149	4,86	1,78	4,41	**2.000**
0,879	2,33	2,607	6,76	1,828	4,46	2,506	6,05	2,838	7,20	1,643	3,72	2,859	7,08	**1.000**
2,867	7,60	4,138	10,73	6,672	16,27	1,234	2,98	2,426	6,15	7,605	17,21	2,891	7,16	**0,500**
6,244	16,55	4,669	12,11	5,076	12,38	10,1	24,40	6,215	15,76	4,862	11,00	5,325	13,20	**0,250**
2,717	7,20	1,086	2,82	1,258	3,07	1,231	2,97	1,294	3,28	1,521	3,44	1,562	3,87	**0,125**
1,542	4,09	1,414	3,67	1,242	3,03	1,564	3,78	1,293	3,28	0,742	1,68	1,453	3,60	**0,062**
22,617	59,95	22,926	59,46	21,901	53,40	23,037	55,64	22,508	57,08	23,926	54,14	23,651	58,61	**fundo**
Total:37,728	100 %	**Total:38,559**	100 %	**Total:41,01**	100 %	**Total:41,4**	100 %	**Total:39,43**	100 %	**Total:44,192**	100 %	**Total:40,356**	100 %	

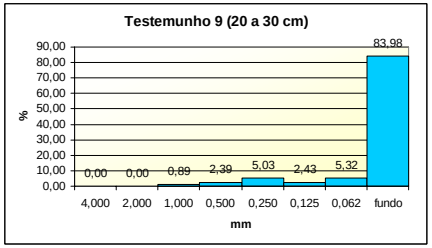
Seção 140 a 150 cm		Seção 150 a 160 cm		Seção 160 a 170 cm		Seção 170 a 180 cm		Seção 180 a 190 cm		fração
Peso	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**Peso**	**%**	**mm**
1,131	2,69	0,677	1,57	0,705	1,77	0,751	1,84	0,598	1,45	**4.000**
1,417	3,37	1,496	3,46	1,646	4,14	1,738	4,25	1,513	3,68	**2.000**
1,135	2,70	3,181	7,36	2,845	7,15	3,028	7,41	3,208	7,80	**1.000**
2,671	6,35	7,81	18,08	2,662	6,69	2,011	4,92	3,211	7,81	**0,500**
5,37	12,77	4,505	10,43	4,227	10,63	4,734	11,58	4,103	9,98	**0,250**
3,805	9,05	0,877	2,03	1,501	3,77	1,723	4,21	1,65	4,01	**0,125**
3,742	8,90	0,782	1,81	1,547	3,89	1,675	4,10	1,575	3,83	**0,062**
22,76	54,13	23,859	55,23	22,621	56,88	25,242	61,74	25,252	61,43	**fundo**
Total:42,049	100 %	**Total:43,203**	100 %	**Total:39,773**	100 %	**Total:40,885**	100 %	**Total:41,11**	100 %	

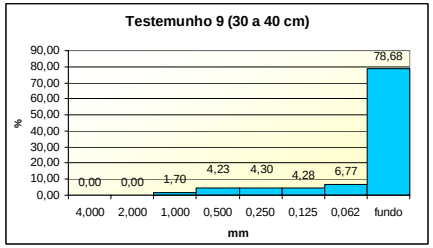
Testemunho 9 – Histogramas representativos das porcentagens medidas para cada tipo de sedimento

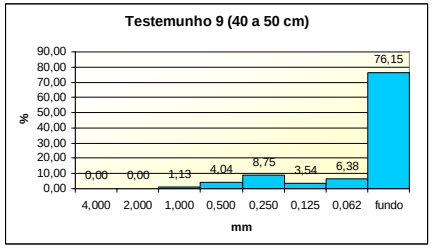


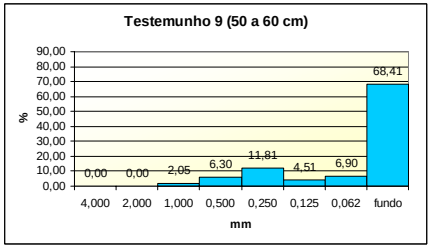


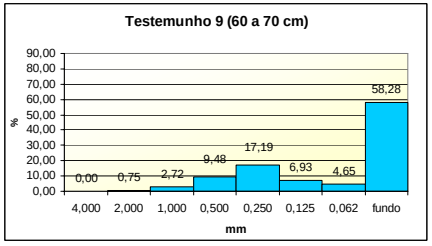


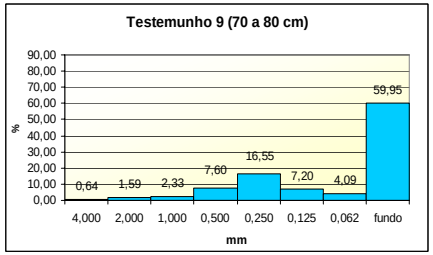


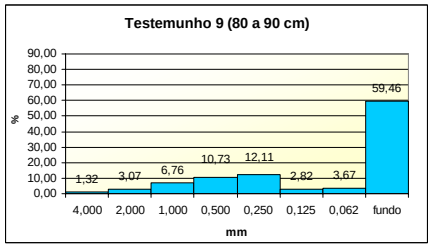


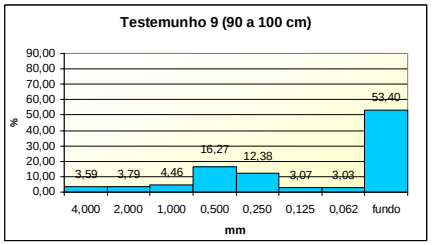


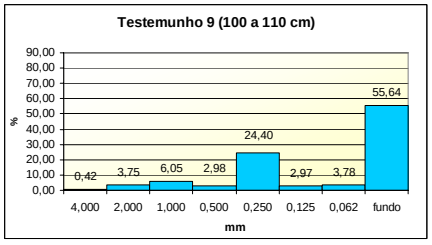


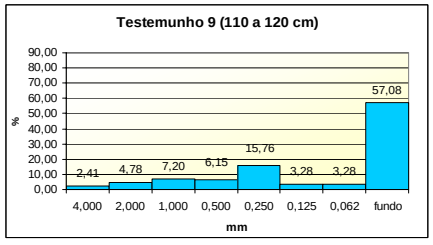


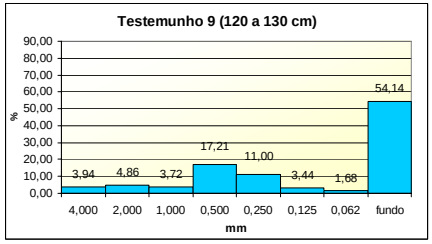


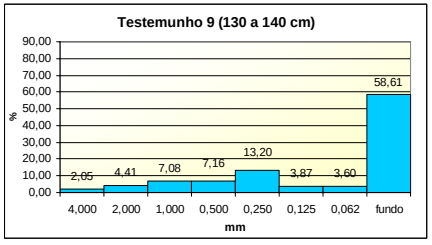


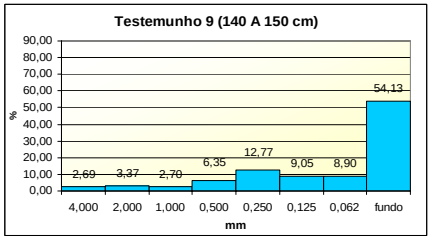


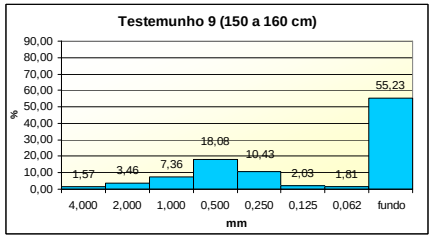




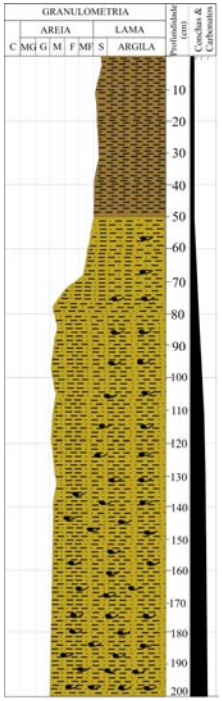


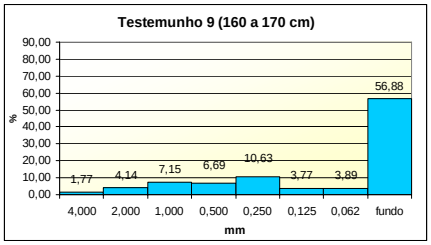


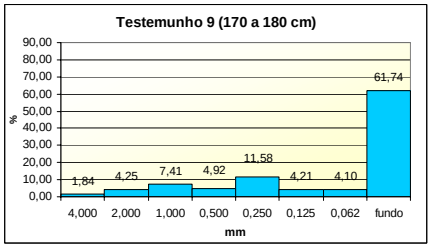


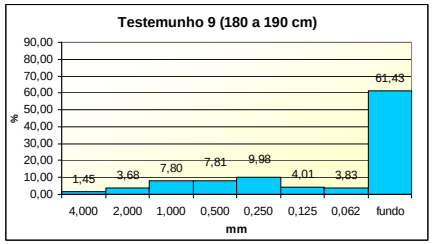


Testemunho 9 – Histogramas representativos das porcentagens medidas para cada tipo de sedimento









Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo