



Análise da propagação das ondas compressoriais (P) em sedimentos marinhos e sua aplicação na caracterização das propriedades acústicas do ambiente

Helber Carvalho Macedo^{1(*)}, Alberto Garcia de Figueiredo Jr.², Lucia Artusi¹ e Sílvia Ramos Souza³

¹ Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira - IEAPM

² Departamento de Geologia, LAGEMAR, Universidade Federal Fluminense – UFF

³ Empresa Husky Duck Equipamentos e Serviços

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The physical properties of marine sediments have been systematically acquired and studied in various parts of the world. However, several theories have proved that sedimentological parameters such as grain size, bulk density, porosity and water content cause relevant dispersion in models of measuring wave propagation. The aim of this study is the investigation of the relationship between a relative broad spectrum of these physical properties and geoaoustic parameters. Two different physical properties have been investigated: velocity and the attenuation of compressional waves.

An apparatus was constructed to measure these physical properties using ultrasonic waves (2,25 MHz). Some experiments have demonstrated good results with this approach in terms of resolution and penetration rate.

The first laboratory results were performed in cores collected on the continental shelf offshore the city of Arraial do Cabo, in Rio de Janeiro state. The preliminary experiments indicate that fine-grain sediments display distinguishable properties in terms of acoustic wave speed. More measures are being done in those cores. The propagation and dispersion will be also compared with extensive data sets taken from literature.

The results obtained are encouraging and indicate a feasible method to analyze the relationships between compressional wave propagation and sedimentological parameters.

Introdução

As propriedades físicas de sedimentos do fundo marinho têm sido objeto de estudo de inúmeros projetos em diferentes partes do mundo. Dentre estas propriedades destacamos, neste trabalho, a velocidade de propagação (Vp) e a atenuação de ondas compressoriais (P).

Nas últimas décadas, Hamilton *et al.* (1970, 1980 e 1985), Richardson *et al.* (1997 e 2002), Ayres Neto (1998) e Buckingham (2000 e 2004) realizaram diversos experimentos e publicaram dados e conceitos que indicam que a propagação da onda compressional

depende, principalmente, de parâmetros sedimentológicos do meio, tais como: porosidade, densidade, teor de água e dimensão das partículas que compõem o sedimento.

Para melhor compreendermos tal dependência, é necessário recorrermos à: - modelos teóricos de propagação de uma onda em determinado meio, como foi por exemplo recentemente desenvolvido por Buckingham (2000), baseado na dissipação de energia devido ao contato entre os grãos; e - experimentos de medição de velocidade de onda "P", como o realizado em laboratório por Maa *et al.* (1997), com base no tempo de consolidação dos sedimentos.

Sendo assim, este estudo tem como propósito desenvolver um método que relacione os parâmetros sedimentológicos e as propriedades acústicas de sedimentos marinhos, coletados por meio de testemunhos de sondagem, comparando os resultados obtidos com aqueles disponíveis na literatura.

Para atender a este propósito, foi desenvolvida e montada no Laboratório de Geologia Marinha (LAGEMAR – UFF) uma aparelhagem que emite e recebe sinais de ondas "P", registrando e armazenando a sua forma de propagação. Estas ondas são geradas a partir de pulsos elétricos, em uma frequência de 2,25 MHz (10 volts, pico-a-pico). Em março deste ano, este sistema foi testado, utilizando amostras de água doce, areia média, areia fina e argila. Os valores encontrados, apesar de preliminares, podem ser considerados como satisfatórios.

Em abril deste ano, foram coletados testemunhos 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 (Figura 1). Nessas amostras serão realizadas medidas de "Vp" e atenuação da onda. Posteriormente, com a abertura dos testemunhos, será feita a análise sedimentológica do material.

Portanto, apesar deste trabalho encontrar-se em desenvolvimento, os primeiros resultados indicam que a aparelhagem desenvolvida produziu medições com valores aceitáveis, quando comparados com aqueles tabelados por experimentos anteriores (Maa *et al.*, 1997 e Hamilton *et al.*, 1982), o que serve de motivação para a execução das próximas fases do projeto, cujo resultado final poderá ser aplicado em pesquisas relacionadas à propagação acústica em ambientes marinhos, à prospecção de minerais e à caracterização geotécnica do solo na plataforma continental e talude.

Método

Para desenvolver e montar a aparelhagem de medições, o projeto contou com o apoio do Laboratório de Ultra-Som do Programa de Engenharia Biomédica da Coppe – UFRJ, que possui equipamentos e softwares adequados para a construção do sistema. Também foi necessário adquirir um par de transdutores modelo V-133 RM (GE-Panametrics, frequência de 2,25 MHz e diâmetro nominal de 9 mm).

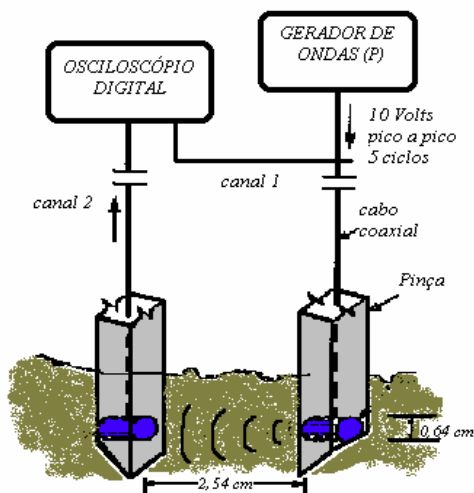


Fig. 2 - Sistema experimental de medição da velocidade de propagação e atenuação de onda acústica. Ferramenta inserida em sedimentos de um testemunho (Modificado de Maa *et al.*, 1997).

O sistema proposto (Figura 2) tem como base o experimento de Maa *et al.* (1997). No entanto, como gerador e receptor dos sinais, é utilizada uma placa Matec SR-9000 condicionada a um “slot” de expansão de um computador comum. Na aquisição e no processamento dos dados são usados programas específicos (LabView e MatLab), o que permite a medição do tempo de percurso do pulso acústico e a atenuação, além da análise espectral do sinal na tela do computador.

Associado a este sistema, está um osciloscópio digital Tektronix TDS 3000B, instrumento que permite o controle e o ajuste do sinal recebido.

O modelo teórico de propagação do ultra-som em sedimentos marinhos 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 compressoriais em meios distintos, uma vez que a distância entre os pontos de geração e recepção do sinal é previamente estabelecida.

Optou-se pela realização das medidas utilizando a propagação do ultra-som (2,25 MHz), tendo em vista a melhor resolução em profundidade oferecida por este tipo

de sinal, o que atenderia ao compromisso do trabalho no que diz respeito à relação “alcance do sinal propagado X resolução”.

Nos dias 19 e 20 de abril deste ano, os sedimentos do fundo marinho foram coletados em posições previamente selecionadas na área estabelecida por este projeto (Figura 3). Foi usado um testemunhador à pistão tipo Kullenberg, com diâmetro do tubo de 50 mm e um peso total de 90 Kg. O equipamento operou de modo satisfatório, uma vez que foram coletados testemunhos de até 2,19 m de comprimento (Tabela 1).

Tabela 1 – Resumo das características dos testemunhos

Amostra	Comprimento testemunho	Profundidade da coleta
1	0,72 m	41,2 m
2	1,52 m	49,4 m
3	0,61 m	52,1 m
4	0,83 m	93,5 m
5	2,06 m	63,3 m
6	1,02 m	87,5 m
7	2,18 m	110,5 m
8	0,81 m	119,5 m
9	2,19 m	90,5 m

Nessas amostras serão realizadas as medições das propriedades acústicas do material recolhido (*velocidade de propagação do som e atenuação da energia*) que, posteriormente, servirão de base para o cálculo de seus parâmetros sedimentológicos (*densidade, porosidade, teor de água, coeficiente de absorção e coeficiente de cisalhamento*), fatores estes fundamentais para a análise dos parâmetros geoacústicos do fundo e subfundo marinhos, tais como: *profundidade de penetração do som, definição das principais superfícies refletoras, geometria e espessura dos estratos de sedimentos*.

As medições serão obtidas com a inserção dos transdutores no próprio sedimento, conforme ilustrado na figura 2. A distância entre estes dois pontos será controlada (Ex: 2,54 cm). Os transdutores transformarão os pulsos elétricos oriundos do gerador em vibrações acústicas que se propagarão na forma de ondas.

Após a realização da análise sedimentológica do material coletado, ocasião em que serão medidas a densidade, a porosidade, a granulometria e o teor de água, será possível relacionar estes resultados com àqueles medidos e calculados durante o processamento dos sinais obtidos com o uso da aparelhagem montada. Conseqüentemente, com este conjunto de dados, poderemos analisar a relação entre a velocidade de propagação e a atenuação da onda compressional e os parâmetros sedimentológicos das amostras.

Além das medições realizadas com o uso da ferramenta (figura 2) que é inserida nos sedimentos de um testemunho aberto, serão conduzidos testes com o testemunho ainda fechado, ou seja: os transdutores serão fixados no tubo e alinhados em posições diametralmente opostas. Assim, além deste método permitir a elaboração de perfis de variação da “Vp” e da

atenuação ao longo de cada testemunho, também será possível comparar os novos valores obtidos com aqueles medidos no testemunho aberto.

Resultados

Recentemente, foram realizados os primeiros testes em amostras de fundo marinho, com aquisição de dados no modo analógico, utilizando um osciloscópio 2235 e um gerador de pulsos PG 501, ambos da Tektronix. Foram feitas três medições, em momentos distintos, para cada uma das amostras, sendo estas com a distância controlada entre transdutores (2,3 cm). A temperatura observada durante todo o experimento foi de 26°C para os sedimentos e de 24°C para a água. A tabela 2 mostra a média aritmética calculada para essas três medições. Os resultados, apesar de ainda serem preliminares, são satisfatórios e estão de acordo com a literatura conhecida. As próximas medições utilizarão o método digital de registro e armazenamento dos dados, o que eliminará qualquer imprecisão nas medidas. Cabe ressaltar, que não houve propagação do som na amostra contendo argila, o que pode ser justificado pela existência de micro bolhas de ar, uma vez que a mesma não se encontrava totalmente saturada. Logo, este fato requer uma maior investigação.

Tabela 2 – Resumo das medições da velocidade de propagação do pulso de ultra-som em sedimentos marinhos.

MEIO	TEMPO (μs)	VELOCIDADE (m/s)
ÁGUA DOCE	17,0	1.479,09
AREIA FINA PENEIRADA	15,2	1.672,77
AREIA MÉDIA	14,84	1.717,92
AREIA FINA COMUM	15,0	1.697,40
ARGILA	0,0	0,0

O dado obtido no osciloscópio, por meio de leitura no display, é o tempo decorrido durante a propagação do pulso de onda compressional (T) no percurso entre o transdutor "emissor" e o transdutor "receptor", posicionados nas extremidades da ferramenta em formato de pinça, utilizada para inserção no meio (amostra).

Inicialmente, imaginava-se que seria possível obter o valor da velocidade de propagação do pulso pela simples divisão do valor da distância conhecida entre os transdutores (L), pelo tempo medido (T). Nesse caso, assumiu-se a velocidade de propagação do ultra-som (US) através da parede de acrílico da ferramenta, que protege a face dos transdutores (*espessura igual a L*), com o valor igual aquele para água. Embora a fina parede de acrílico tenha uma espessura total da ordem de 2 mm (1 mm para cada transdutor) e o percurso total da onda de US seja de 254 mm, houve um erro no valor obtido para a velocidade de propagação do US na água.

Logo, para se obter a velocidade de propagação do som na água (C') e nas amostras, optou-se pelo método abaixo descrito, que eliminou os efeitos causados pela fina espessura do acrílico, utilizando como parâmetro a

reflexão ocorrida na primeira diferença de impedância na haste transmissora da ferramenta (primeira interface).

Portanto, sabendo-se que: $2\Delta L = C \cdot \Delta t$ (1), sendo:

- ΔL a fina película de acrílico que separa os transdutores do meio (amostra);
- C a velocidade do pulso no acrílico; e
- Δt o tempo que o pulso leva para percorrer o acrílico.

$$\text{e que: } \frac{2\Delta L}{C} + \frac{L}{C'} = T \text{(2),}$$

sendo:

- L a distância entre as faces da pinça (medida com o paquímetro);
- C' a velocidade de propagação do pulso na água; e
- T o tempo de percurso do pulso em todo o trajeto.

e utilizando os valores de:

$$L = 2,3 \text{ cm (medido)}$$

$$T = 17 \mu\text{s (observado no osciloscópio)}$$

$$?t = 1,45 \mu\text{s (observado no osciloscópio),}$$

foi calculado o valor de $C' = 1.479,099$ m/s, para a velocidade de propagação na água doce, sendo este valor muito próximo dos já conhecidos e tabelados. A temperatura da água medida foi de 24°C.

Para o cálculo da velocidade nas amostras, optou-se por um método que utiliza como fundamento a diferença entre o tempo de propagação na água (T') e no meio (T''), ou seja:

$$T' = \Delta t + \frac{L}{C'} \text{(3)}$$

$$\text{e } T'' = \Delta t + \frac{L}{C''} \text{(4),}$$

sendo C'' a velocidade na amostra que se deseja calcular.

Desenvolvendo a subtração de (3) por (4), chegamos à fórmula de:

$$C'' = \frac{C' \cdot L}{L - C'' \cdot (T' - T'')} \text{(5),}$$

que utiliza como parâmetro a velocidade de propagação na água já calculada anteriormente ($C' = 1.479,099$ m/s).

O resumo dos resultados obtidos nas medições é demonstrado no gráfico constante da figura 4.

Conclusões

A aparelhagem de medição da velocidade da onda compressional (V_p) e sua atenuação, desenvolvida para este trabalho, obteve resultados aceitáveis, quando comparados à literatura (Tabela 2).

O sistema montado na embarcação do IEAPM, composto pelo testemunhador a pistão tipo Kullenberger, com tubo de 50 mm, mostrou-se adequado para coletas em profundidades que variam de 41,0 m até 120,0 m, uma vez que foram coletados testemunhos de até 2,19 m de comprimento, em diversos tipos de fundo.

Agradecimentos

Ao IEAPM e ao LAGEMAR-UFF, pelo apoio irrestrito, o que permite a realização desta pesquisa. Ao Programa de Engenharia Biomédica da Coppe – UFRJ, em especial ao Prof. Ph. D. João Carlos Machado. À empresa Husky Duck Equipamentos e Serviços, em especial ao Sr. Sílvio Ramos Souza e a tripulação da embarcação Diadorim do IEAPM.

Referências

- 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. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch – Naturwissenschaftlichen Fakultät zu Kiel. Kiel, 126pg.
- Artusi, L.**, 2004, Geologia, geomorfologia e sismoestratigrafia rasa da plataforma continental ao largo da laguna de Araruama – RJ. Dissertação de Mestrado - Departamento de Geologia da Universidade Federal Fluminense (UFF).
- M. J. Buckingham**, 2004, Compressional and shear wave properties of marine sediments: comparisons between theory and data, *J. Acoust. Soc. Am.* **117**, 137-152.
- M. J. Buckingham**, 2004, A three-parameter dispersion relationship for Biot's fast compressional wave in a marine sediment, *J. Acoust. Soc. Am.* **116**, 769–776.
- M. J. Buckingham**, 2000, Wave propagation, stress relaxation, and grain-to-grain shearing in saturated, unconsolidated marine sediments, *J. Acoust. Soc. Am.* **108**, 2796–2815.
- E. L. Hamilton, G. Shumway, H. W. Menard, and C. J. Shipek**, 1956, Acoustic and other physical properties of shallow-water sediments off San Diego, *J. Acoust. Soc. Am.* **28**, 1–15.
- E. L. Hamilton, H. P. Bucker, D. L. Keir, and J. A. Whitney**, 1970, Velocities of compressional and shear waves in marine sediments determined *in situ* from a research submersible, *J. Geophys. Res.* **75**, 4039–4049.
- E. L. Hamilton**, 1971, Elastic properties of marine sediments, *J. Geophys. Res.* **76**, 579–604.
- E. L. Hamilton and R. T. Bachman**, 1982, Sound velocity and related properties of marine sediments, *J. Acoust. Soc. Am.* **72**, 1891–1904.
- E. L. Hamilton**, 1972, Compressional-wave attenuation in marine sediments, *Geophysics* **37**, 620–646.
- E. L. Hamilton**, 1980, Geoacoustic modeling of the sea floor, *J. Acoust. Soc. Am.* **68**, 1313–1336.
- E. L. Hamilton**, 1979, Sound velocity gradients in marine sediments, *J. Acoust. Soc. Am.* **65**, 909–922.
- E. L. Hamilton**, 1985, Sound velocity as a function of depth in marine sediments, *J. Acoust. Soc. Am.* **78**, 1348–1355.
- E. L. Hamilton**, 1976, Sound attenuation as a function of depth in the sea floor, *J. Ac. Soc. Am.* **59**, 528–535.
- M. J. Buckingham**, 1997, Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments, *J. Acoust. Soc. Am.* **102**, 2579–2596.
- M. D. Richardson**, 1997, *In-situ*, shallow-water sediment geoacoustic properties, in *Shallow-Water Acoustics*, edited by R. Zhang and J. Zhou – China Ocean, Beijing, China, pp. 163–170.
- M. D. Richardson**, 2002, Variability of shear wave speed and attenuation in surficial 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, pp. 107–114.
- Maa, J. P. -Y.; Sun K.-J.; HE Q.** - 1997 – Ultrasonic characterization of marine sediments - Preliminary Study (Marine Geology) – Virginia Institute of Marine Science.
- M. A. Biot**, 1956, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range, *J. Acoust. Soc. Am.* **28**, 168–178.
- M. D. Richardson and K. B. Briggs**, 1996, *In situ* and laboratory geoacoustic measurements in soft mud and hard-packed sand sediments: Implications for high-frequency acoustic propagation and scattering, *Geo-Mar. Lett.* **16**, 196–203.
- Greco, Ana**, 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, UFRJ.

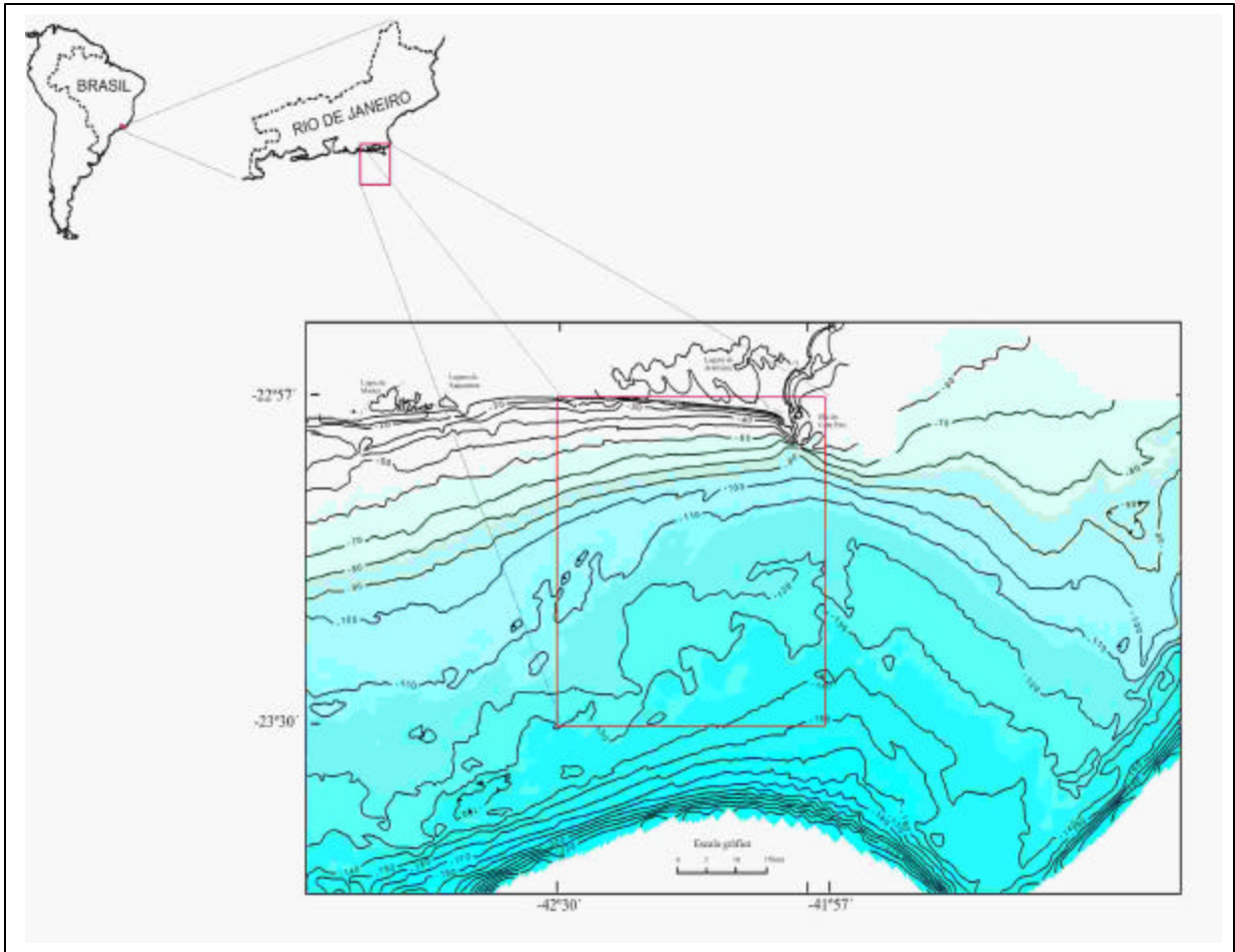


Fig. 1 – Área selecionada para o desenvolvimento da pesquisa e para a coleta das amostras de sedimento (Região de plataforma continental, em frente à Laguna de Araruama, Arraial do Cabo, RJ. (Artusi, 2004)

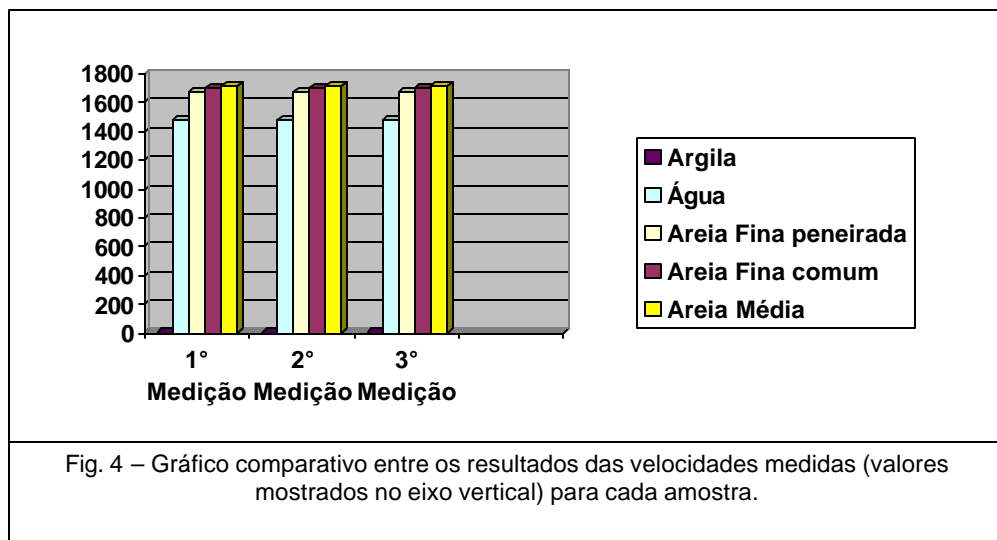


Fig. 4 – Gráfico comparativo entre os resultados das velocidades medidas (valores mostrados no eixo vertical) para cada amostra.

