



Experimentos laboratoriais com GPR (1GHz) em corpos arenosos para analisar a influência da água e de hidrocarbonetos na sua velocidade de propagação.

Marco A. B. Botelho (CPGG / UFBA), Sandro L. Machado (GEOAMB / UFBA), Tiago C. Dourado (CPGG/UFBA) e Nelson S. Amparo (GEOAMB / UFBA).

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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

We report on GPR measurements (1000 MHz) which were carried out on a well sorted, clean sand in a laboratory experimental site. The laboratory system includes a glass box, measuring $1.0 \times 0.7 \times 0.7 \text{ m}^3$, with sand saturated with water and/or hydrocarbons. Our studies investigate the influence of different fluids on the propagation velocity of the GPR pulse across the sandy layers, at different moistures. The GPR velocities are determined using two-way traveltime CMP reflection data, the $T^2 - X^2$ and the Dix Equation techniques. A four phases (air, water, oil and sand) equation is presented here, it was built based on CRIM method and predicts the GPR propagation velocity based on porosity, saturation and dielectric properties of each phase. The experimental values of velocity had a very good agreement with the predicted ones from the analytical equation. The velocity decreases from 15 cm/ns in a sand with 3% of humidity to 5 cm/ns in a sand with 24% of humidity.

Introdução

Entre as muitas aplicações bem sucedidas do Radar de Penetração no Solo ou GPR (Ground Penetrating Radar), estão o mapeamento de plumas de contaminação, a investigação sobre águas subterrâneas, a detecção de vazamentos de hidrocarbonetos, bem como a localização dos tanques e tubulações que originaram tais vazamentos. Enfim, o GPR é uma ferramenta muito versátil, e que apresenta grande potencial para avaliações de áreas que sofreram desastres ambientais (derrames de hidrocarbonetos ou resíduos tóxicos) e estudos sobre propriedades (geometria, porosidade, saturação, etc...) de mananciais e aquíferos rasos localizados em terrenos arenosos. Os trabalhos pioneiros, como o de Beres e Haeni (1991), tinham como objetivo apresentar o GPR como uma ferramenta capaz de determinar o lençol freático, a geometria do aquífero e revelar aspectos estratigráficos do pacote sedimentar que envolve o aquífero. Porém, a característica de apresentar um melhor desempenho em litologias ou revestimentos, eletricamente mais resistentes, foi logo estabelecida. Atualmente, existem muitos trabalhos que estudam os efeitos causados pela presença de água, hidrocarbonetos ou resíduos industriais fluidos na

velocidade de propagação do pulso de radar, na atenuação do sinal ou na reflexão de tais pulsos. O trabalho de Greaves et al (1996), mostra como se pode empregar aquisições de dados com afastamentos variáveis para estimar o conteúdo de água em sedimentos arenosos mediante a análise da velocidade de propagação do pulso de radar, o que é possível se realizar usando o clássico processamento CMP. O trabalho de Greaves et al (1996) nos apresenta relações entre as velocidades intervalares e o conteúdo de água em amostras de solo ou rochas permitindo inferir porosidade e saturação dos pacotes arenosos. O trabalho de Hagrey e Müller (2000), estuda o efeito da saturação e salinidade da água em parâmetros como a velocidade e o coeficiente de reflexão dos pulsos de radar. Neste estudo os experimentos foram realizados em modelos físicos muito bem controlados para permitir avaliar os dados obtidos com as antenas de 500 e 900 MHz.

Existem ainda trabalhos com GPR dedicados a mostrar uma "visibilidade eletromagnética" das interfaces água/hidrocarboneto, entre eles o de Carcione e Seriani (2000), onde constroi-se modelos numéricos e experimentais de solos arenosos ou silto-argilosos, saturados.

Nesta pesquisa, desenvolvemos um equipamento para realizar levantamentos de dados de radar com afastamento variável empregando antenas de 1000 MHz. Este sistema permite realizar experimentos controlados onde, a partir de famílias CMP (Common Mid Point) ou WARR (Wide Angle Reflection and Refraction), determinaremos as velocidades RMS e então as intervalares, para finalmente correlacionarmos as propriedades físicas do reservatório simulado, tais como porosidade, saturação, constantes dielétricas.

Inicialmente, procuramos avaliar o papel que tem a umidade num pacote arenoso em relação à velocidade de propagação do pulso de GPR, embora sua potencialidade só se revele em ambientes onde as propriedades do solo permitam que as ondas eletromagnéticas viajem em profundidade, sem sofrer grandes efeitos dispersivos e de absorções.

Metodologia

O equipamento, mostrado na figura 1, consiste de uma caixa de acrílico com volume interno de aproximadamente $0,5 \text{ m}^3$ e um sistema mecânico para garantir o espaçamento equidistante das antenas transmissora e receptora. As pequenas dimensões da caixa de areia, de $1,0 \times 0,70 \times 0,70 \text{ m}$, permitem que as antenas de radar utilizadas sejam de 1 Ghz.

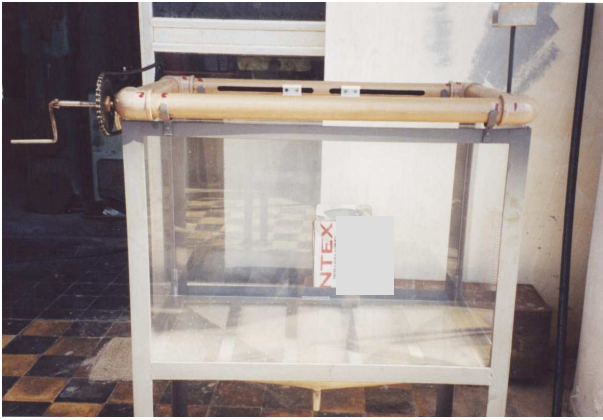


Figura 1 – Equipamento desenvolvido para a realização de testes do tipo CMP em laboratório.

Os ensaios foram feitos seguindo o arranjo CMP, no modo biestático e com o par de antenas de alta frequência (1GHz) proporcionando alta resolução. O esquema mostrado na figura 2 esboça o modelo de separação das antenas na coleta CMP para o experimento em questão.

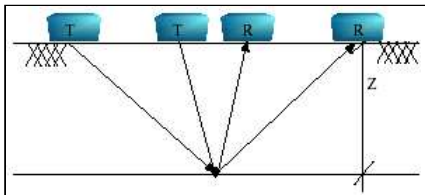


Figura 2

O sistema de GPR utilizado foi o RAMAC/GPR Control Unit II (CUII), porém utilizando duas antenas de 1GHz. O controle de separação das antenas é realizado por um sistema de correntes controlados por uma manivela e que proporciona a separação de duas pequenas plataformas de madeira em sentidos contrários, preservando a mesma distância entre elas e o ponto central do arranjo. A distância de separação é aferida por um odômetro a fio da RAMAC SYSTEM.

Determinação das velocidades de propagação do pulso de GPR

a) A velocidade RMS (O Método $T^2 - X^2$)

Os tempos de trânsito da energia refletida dependem da profundidade do alvo, da velocidade acima do mesmo, como também da distância de afastamento entre fonte e receptor. A equação que bem simplifica este comportamento é:

Equação_1:

$$t^2 = \frac{x^2}{V_s^2} + t_0^2$$

Assim, usando o clássico método $t^2 - x^2$, bem difundido nos trabalhos sísmicos, obtém-se a equação de uma reta contendo coeficiente angular igual ao inverso do quadrado da velocidade que originou a hipérbole e cortando o eixo vertical em t_0 , a partir do qual pode-se determinar a profundidade do refletor, uma vez que:

$$t_0^2 = \frac{4.z^2}{V_{rms}^2}, \text{ Onde o termo } V_{rms} \text{ é velocidade RMS (root}$$

minimum square) até o ponto de registro da hipérbole.

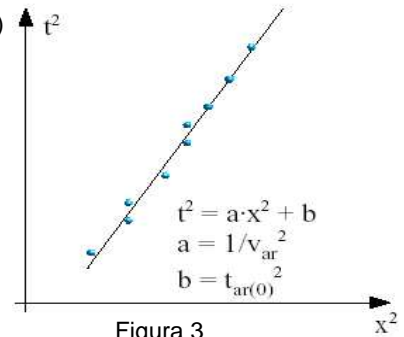


Figura 3



A figura 4 – Pode-se observar o citado par de antenas com 1GHz, uma funcionando como transmissora e a outra como receptora. As antenas estão localizadas a um nível acima do topo da areia de cerca de 10cm. Obviamente, este constituirá uma primeira camada de ar onde a reflexão em sua base será também observada nos radargramas.

b) Velocidades intervalares

No caso da ocorrência de várias camadas plano-paralelas numa mesma seção, as velocidades das hipérbolas, representam a velocidade RMS para aquela profundidade. Para calcular as velocidades de camadas intercaladas por hipérbolas, pode-se recorrer ao procedimento lançado por Dix (1955):

Equação_2:

$$V_n = \sqrt{\frac{V_{m,n}^2 \cdot T_{total,n} - V_{m,n-1}^2 \cdot T_{total,n-1}}{(T_{total,n} - T_{total,n-1})}}$$

Na equação de Dix, V_n corresponde a velocidade de propagação do pulso eletromagnético na camada n , $V_{m,n}$ corresponde à velocidade média de propagação até a base da camada n , $T_{total,n}$ corresponde ao tempo total de percurso, ida e volta, até a base da camada n . $V_{m,n-1}$ e $T_{total,n-1}$ têm significados análogos aos termos $V_{m,n}$ e $T_{total,n}$, para o caso da camada $n-1$.

Observando a equação de Dix, nota-se que devido à sua raiz ser par, existe a possibilidade de se chegar a valores complexos nas situações onde a velocidade diminua com a profundidade, o que é comum em dados de radar.

Considerando que os percursos propagados pelas reflexões até as interfaces n e $n-1$ são essencialmente idênticos a menos do deslocamento dentro da camada em consideração, consideramos neste trabalho o módulo da diferença presente no numerador da equação de Dix.

Equações descritivas da resposta dielétrica

A velocidade intervalar é o conceito de velocidade, oriundo do processamento sísmico, que mais se aproxima do conceito de velocidade característica de um meio físico-geológico. Uma camada geológica, ou um pacote de camadas, geralmente com predominância de uma litologia, são descritos por sua velocidade intervalar na sísmica de exploração de hidrocarbonetos. Existem trabalhos na literatura que estabelecem relações entre velocidade de propagação do pulso de uma onda, sísmica ou eletromagnética, com diferentes propriedades físicas de material em estudo.

A equação apresentada por Wyllie (1958) estabelece uma relação entre a velocidade de propagação da onda acústica em um meio bifásico revelando sua dependência com a porosidade:

Equação_3:

$$\frac{1}{V} = \frac{n}{V_w} + \frac{1-n}{V_s}$$

onde, n corresponde à porosidade do meio, V_w corresponde à velocidade da onda no fluido que preenche os vazios do solo e V_s corresponde à velocidade média de propagação da onda através das partículas sólidas.

Atualmente existem diversas equações desenvolvidas experimentalmente ou teoricamente para descrever a resposta dielétrica de misturas heterogêneas ou polifásicas. Vide Greaves et al (1996). A equação de CRIM (Complex Refractive Index Method) é uma equação semi-empírica que relaciona a constante dielétrica de um meio

com a porosidade (ϕ) preenchida por água. Nas frequências de radar:

Equação_4:

$$\sqrt{k_e} = \phi \sqrt{k_w} + (1-\phi) \sqrt{k_g}$$

Onde k_e , k_w , k_g são as constantes dielétricas do meio, do fluido dos poros e do grão mineral, respectivamente.

Para uma mistura com três fases, a vagariedade obtida para o material pode ser expressa pela soma em série das diferentes fases:

Equação_5:

$$\sqrt{k_e} = \phi S_w \sqrt{k_w} + (1-\phi) \sqrt{k_g} + \phi(1-S_w) \sqrt{k_a}$$

A equação de CRIM é a análoga elétrica à equação de Wyllie.

Resultados

Experimentos desenvolvidos

Dois modelos envolvendo somente areia, água e ar foram criados visando avaliar o comportamento da umidade na velocidade do pulso de GPR em materiais contendo estas três fases. O primeiro modelo teve a caixa preenchida com areia seca e o segundo com areia saturada, uma vez que o modelo inicial teve quantidades determinadas de água injetadas até ocorrer a saturação.

Para determinar a velocidade no pacote, uma chapa foi utilizada como refletor para gerar uma hipérbole bem definida.

O primeiro experimento, areia seca, forneceu o radargrama mostrado na figura 5. O refletor AA', proveniente da placa metálica subjacente à areia seca, foi usado para a tomada dos tempos do pulso de radar refletido na chapa para diferentes espaçamentos entre a fonte e o receptor.

O segundo experimento, com a areia saturada a 24%, forneceu o radargrama mostrado na figura 6. Nele pode-se observar o refletor BB', também proveniente da chapa metálica, o qual foi utilizado para a determinação da velocidade.

O terceiro modelo utilizou a mesma caixa, porém, neste experimento, além das três fases dos modelos iniciais, um outro fluido, no caso o óleo diesel, foi injetado até a saturação. Assim, a caixa ficou com uma camada de areia saturada com água na parte inferior e uma camada de areia saturada com óleo diesel na superior, como mostra a figura 7.

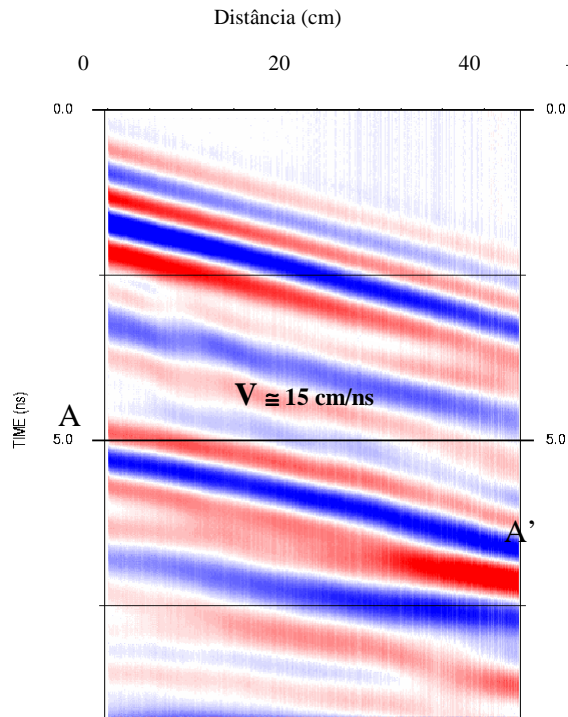


Figura 5 – Radargrama do experimento para a areia seca ao ar livre, com uma umidade de cerca de 2%. Note que a janela de tempo escolhida foi de 10 ns.

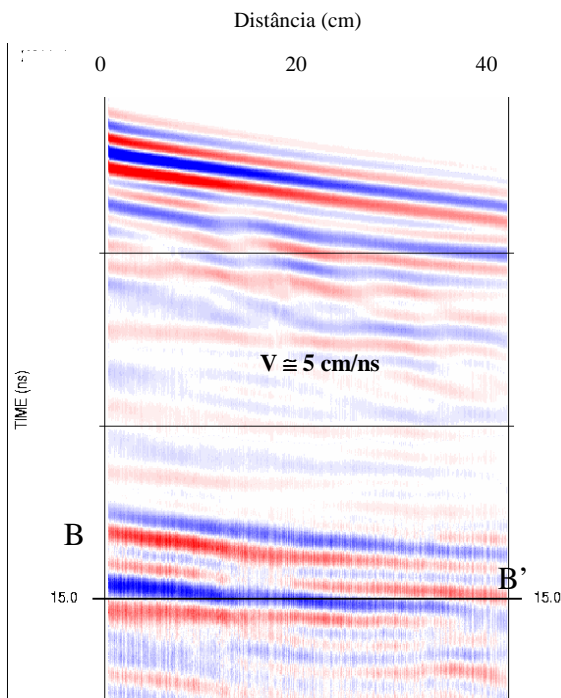


Figura 6 – Radargrama do experimento para a situação onde a caixa estava totalmente saturada, correspondendo a um único meio homogêneo, com umidade de aproximadamente 24%. Note que a janela de tempo escolhida necessitou ultrapassar os 15 ns para registrar o fundo da caixa.

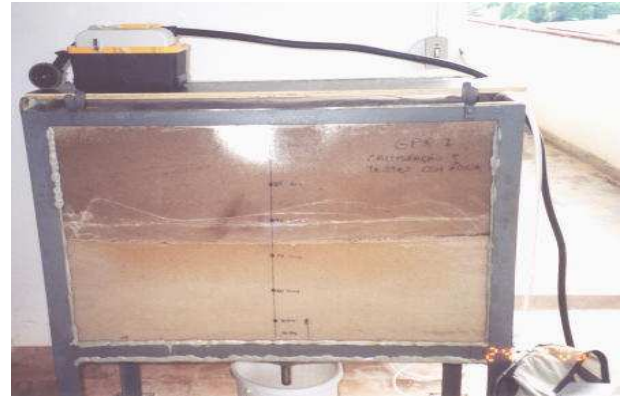


Figura 7 – Foto do experimento na situação onde os dois meios estão saturados, com hidrocarboneto (na parte superior) e com água na inferior. Observe na fronteira entre as fases o filme plástico limitando os dois meios.

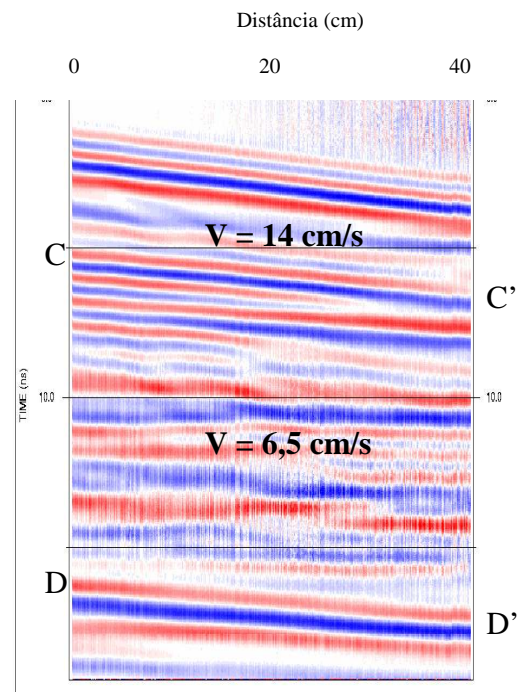


Figura 8 – Radargrama do terceiro modelo para a situação onde os dois meios já estavam saturados, com umidade de óleo de aproximadamente 20%. Note que a janela de tempo escolhida necessitou ultrapassar os 15 ns para registrar base da camada saturada de água.

Para que as hipérbolas geradas tivessem uma resolução adequada no eixo do tempo, a janela de tempo de cada ensaio foi modificada em função do teor de umidade do solo. Para o caso da areia seca ao ar, com valores de umidade em torno de 2%, a janela de tempo utilizada foi de apenas 9 ns. Para o caso da areia saturada, devido ao decréscimo esperado na velocidade da onda

eletromagnética, a janela de tempo adotada foi superior a 20 ns.

A partir das medidas dos tempos de trânsito dos pulsos refletidos com diferentes afastamentos, obedecendo um arranjo CMP, construímos um gráfico com auxílio do método $t^2 - x^2$ para os três modelos usados. O primeiro gráfico, vide figura 9a, tem duas retas correspondentes à reflexão obtida no modelo com areia seca (linha azul) e também à reflexão com areia saturada (linha vermelha). O gráfico da Figura 9b apresenta os resultados do terceiro experimento, nele existem duas retas correspondentes às reflexões na base da camada superior, a qual é saturada de óleo (azul), e na base da camada inferior, saturada com água.

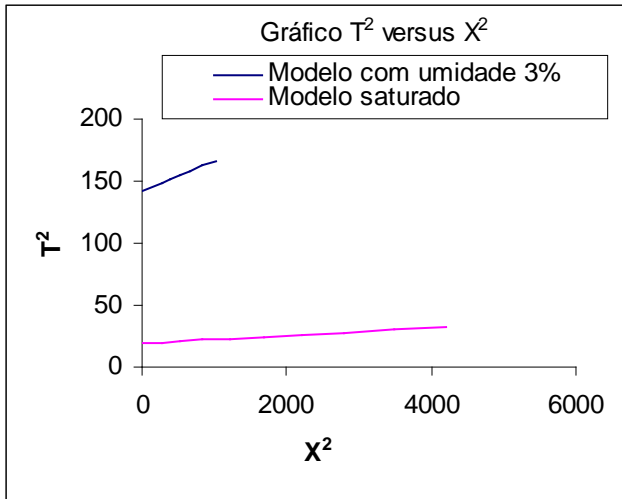


Figura 9a - A reta superior (azul) foi obtida no modelo da areia seca (3%) e forneceu uma velocidade RMS de 17,56 cm/ns e a Intervalar de 15,08 cm/ns. A reta vermelha, obtida no modelo com areia saturada (24%), forneceu uma velocidade RMS de 6,34 cm/ns, da qual obtivemos a velocidade Intervalar de 5,08 m/ns.

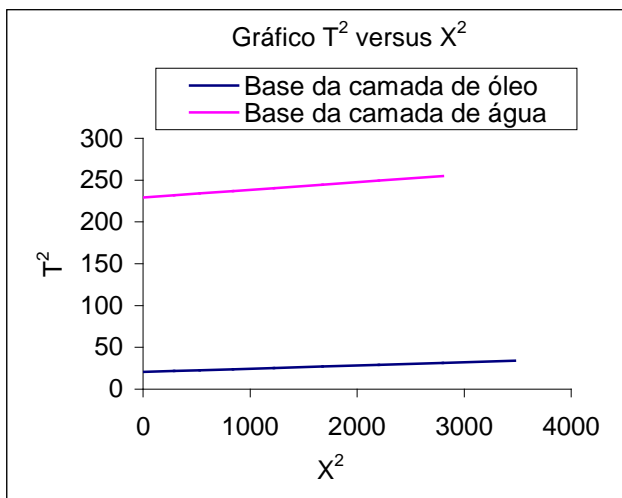


Figura 9b – Gráfico do terceiro modelo. A reta inferior (azul) foi obtida das reflexões na base da camada de

areia saturada com óleo diesel, fornecendo uma velocidade RMS de 16,12 cm/ns, de onde obtivemos a intervalar de 13,97 cm/ns. A reta superior (vermelha) foi obtida na base da camada de areia saturada com água (20%), revelando uma velocidade RMS de 10,46 cm/ns e uma intervalar de 6,68 cm/ns.

Os ensaios com GPR, além de terem sido executados para as condições limites dos experimentos, ou seja, material seco e saturado, foram feitos também com diversas condições de umidades, tanto para o modelo de três fases (ar-água-areia) como para o caso de quatro fases onde o óleo foi o fluido responsável pela variação da umidade.

Então, à medida que se calculava uma nova umidade, novos perfis CMP também eram executados para se extrair a velocidade intervalar naquelas condições.

Em posse de diversos valores de umidade e respectivas velocidades Intervalares, foi possível avaliar uma formulação empírica, aqui estabelecida, que relaciona a velocidade de propagação do pulso de radar (1 MHz) em um meio com quatro fases com os respectivos parâmetros físicos de cada fase que compõem o meio.

Equação_6:

$$v = \frac{(1 + e).c}{G.w_1.\sqrt{\epsilon_{rw1}} + \frac{G.w_2.\gamma_{w1}}{\gamma_{w2}}.\sqrt{\epsilon_{rw2}} + \left[e - G \left(w_1 + \frac{w_2.\gamma_{w1}}{\gamma_{w2}} \right) \right] \cdot \sqrt{\epsilon_{rs}} + 1}$$

A equação 6, apresentada acima, foi gerada a partir da Equação de CRIM (vide as equações 04 e 05) e da consideração que a vagariedade do meio arenoso saturado por óleo diesel é resultante da soma das vagariedades das quatro fases presentes (areia, ar, água e óleo diesel).

Nesta equação, w_1 corresponde à umidade gravimétrica da água, w_2 corresponde à umidade gravimétrica do fluido imiscível e os subscritos $w1$ e $w2$ são referentes às características da água e do segundo fluido, respectivamente $\delta w1$ e $\delta w2$ correspondem aos pesos específicos da água e do segundo fluido. Os valores adotados para o ajuste foram $e = 0,62$ (índice de vazios), $G = 2,65$ (densidade relativa das partículas sólidas), $\epsilon_{rs} = 4,2$ (constante dielétrica relativa do quartzo), $\epsilon_{rs} = 80$ (constante dielétrica da água). A constante dielétrica para o óleo diesel foi de $\epsilon_{rw2} = 2,1$

Estes valores são coerentes com o material ensaiado e, a não ser para o caso do índice de vazios do solo, todos os outros valores devem variar pouco em torno dos valores médios adotados.

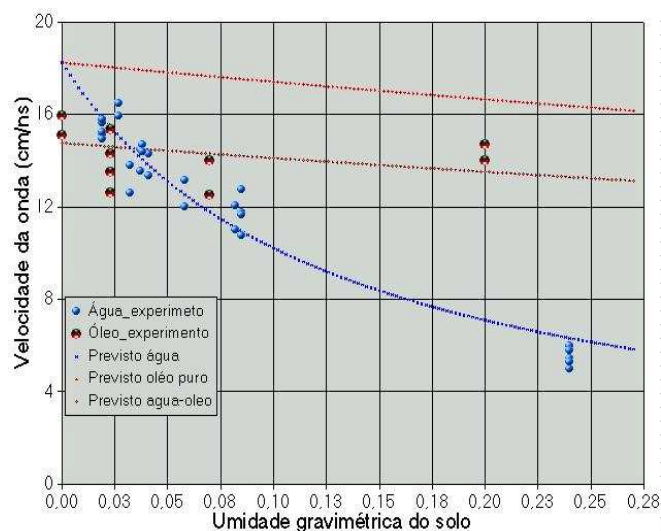


Figura 7 – Gráfico integrando os resultados experimentais com os previstos analiticamente. As curvas representam os valores teóricos obtidos com a aplicação direta da equação 6 aqui apresentada. Os pontos foram obtidos a partir das experimentações com os modelos água-ar-areia, água-areia, água-ar-óleo-areia para diversas proporções destes materiais.

O gráfico acima apresenta todos os resultados obtidos nos três experimentos executados, bem como as curvas ajustadas, fornecidas pela equação 6 desenvolvida nesta pesquisa. Os dados em azul ilustram o experimento trifásico (ar –água –areia), onde as medidas foram realizadas com a umidade gravimétrica da areia variando de 0,03 a 0,09 e no ponto de saturação de 0,24.

A curva mais acima, sem valores experimentais, consiste na situação onde apenas as fases ar-areia-óleo estivessem contidas num meio. Em nossos experimentos a areia continha uma umidade de 0,03, daí a segunda curva marrom, prevista pela Eq.6, se ajustar melhor aos dados experimentais, confirmando o caráter tetrafásico (ar-água-óleo-areia) do meio.

Conclusões

Os valores medidos da velocidade de propagação do pulso de radar em meios arenosos parcialmente saturado com fluidos, obtidos a partir de experimentos controlados, utilizando pulsos de GPR refletidos com afastamentos variáveis, serviram para confirmar a validade do procedimento de se admitir que os solos, os sedimentos, ou mesmo rochas, são compostos por fases distintas dos estados da matéria, gás-líquido-sólido.

No experimento onde apenas um líquido saturava o meio arenoso, no caso a água, os resultados medidos se mostram ainda mais próximos da previsão teórica fornecida pela equação 6. A notável variação de velocidade neste meio é devida à grande variação da sua constante dielétrica. Ou seja, a substituição do ar pela água. No experimento onde se avalia o efeito do

hidrocarboneto líquido, a curva teórica considera quatro fases distintas, ar-água-óleo-matriz, uma vez que a água livre estava impregnada ao material, os resultados não foram tão pronunciados, como é de esperar que para materiais onde a constante dielétrica varie pouco a curva seja pouco íngreme. A fração de ar substituído pelo óleo não afeta tanto a constante dielétrica do conjunto.

Os valores experimentais obtidos neste modelo de quatro fases também foram próximos à curva obtida com a equação apresentada neste trabalho.

O protótipo usado para realizar os experimentos, cujas dimensões e propriedades elétricas do material estudado podem ser bem controlados, serve também para educar o geofísico sobre a propagação da onda eletromagnética e fornecer dados para testar algoritmos de processamento como migração, análise de velocidade, deconvolução, etc...

Agradecimentos

O primeiro autor agradece ao CNPq pelo Auxílio à Pesquisa referente ao processo 468048/00-6. Os quatro autores agradecem ao Laboratório de Geotecnia Ambiental da Escola Politécnica (GEOAMB-UFBA). Finalmente, o terceiro autor agradece à ANP (Agência Nacional do Petróleo) pelo apoio financeiro que lhe foi concedido através da bolsa de estudos de Mestrado PRH-ANP/MCT nº:20015841-7.

Referências Bibliográficas

- Beres, M., and Haeni, F.P., 1991, Application of Ground-Penetrating-Radar methods in hydrogeologic studies, *Ground Water*, v. 29, no. 3, p. 375-386.
- Carcione, J. M., and Seriani, G., 2000, An electromagnetic modeling tool for the detection of hydrocarbons in the subsoil, *Geophysical Prospecting*, 48, 231-256.
- Dix, C. H., Seismic velocities from surface measurements. (1995). *Geophysics*: 20 (1)pp. 68-86.
- Greaves, R. J., Lesmes, D. P., Lee, J. M., and Toksöz, M. N., 1996, Velocity variations and water content estimated from multi-offset, ground-penetrating radar, *Geophysics*, 61, 683-695.
- Hagrey, S. A., and Müller, C., 2000, GPR study of pore water content and salinity in sand, *Geophysical Prospecting*, 48, 63-86.
- Wyllie, M. R. J.; Gregory, A. R.; Gardner, G. H. F., 1958, An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media, *Geophysics*: 23(3), pp. 459-493.