



Experimentos em Laboratório (1 GHz) e Trabalhos de Campo (200 MHz) com GPR Usando Corpos arenosos para Avaliar a Influência da água e de Hidrocarbonetos na Velocidade e na Amplitude da Onda Eletromagnética.

Tiago C. Dourado* e Marco A. Barsottelli Botelho, CPGG/UFBa; Sandro L. Machado e Nelson S. Amparo, GEOAMB/UFBa

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

We analyse GPR measurements (1 GHz) which were carried out on a well sorted, clean sand in a laboratory experimental site and we also executed AVO field experiments, both using TE and TM- mode configurations,. The AVO works were conducted on a sand dune field around the Lagoa do Abaeté (Salvador, Brazil). The GPR pulse velocity decreases from 15 cm/ns in a sand with 3% of water saturation to 5 cm/ns in a sand with 24% of water saturation. In a further step, after almost 100% oil saturation (3% water saturation still remains as irreducible fluid), we could not see any important change of the dielectric constant of the bulk, neither on the velocity of the GPR pulse (from 13 to 15 cm/ns). The presence of water and hydrocarbon saturation can also be estimated by analyzing the AVO trend of the reflection event generated on the interface between the oil-sand and water-sand layers. The measured amplitudes show a very good agreement with the analytical results, considering a dielectric constants ratio of 22,5/4,5, but the Brewster Angle (69°) is not reached because the glass box dimensions only allows to reach 52°. The AVO field experiments were conducted on a sand dune field, where we can find dry layers, partially and fully saturated layers. The velocity analysis of CMP gathers acquired on the place above mentioned reveals a GPR velocity of 125 m/ns for dry sand and a 68 m/ns on a partially saturated sand. The AVO analysis also reveals a ratio of dielectric constants of 1,45 and the Brewster angle is reached at the angle of 33°. The advantage of using the TM-mode configuration (parallel polarization) is the presence of Brewster Angle which can be used to estimate the velocity (or dielectric constant) of the subjacent layer when the properties of the upper layer are known.

Introduction

Atualmente encontramos muitos trabalhos que estudam o comportamento da velocidade de propagação e o padrão de reflexão do pulso de radar quando os sedimentos, solos ou rochas são afetados pela presença de água, hidrocarbonetos ou resíduos industriais fluidos. 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 do pulso de radar implícito nas hipérbolas de reflexão presentes nos radargramas usando o clássico processamento CMP; no citado trabalho, encontramos também 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 são construídos modelos numéricos e experimentais de solos arenosos ou silto-argilosos, saturados. Nesta pesquisa, desenvolvemos um sistema controlado, em ambiente de laboratório, 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 tais velocidades com as propriedades físicas do reservatório simulado, tais como porosidade, saturação, constantes dielétricas. Os refletores correspondentes ao contato óleo-água ou à interface areia seca – areia saturada, presentes nos radargramas CMP, fornecem preciosas informações sobre as propriedades físicas dos meios se analisarmos as amplitudes em função da separação entre a fonte e o receptor, ou seja, do afastamento. Este procedimento, rotineiramente aplicado aos dados sísmicos de reflexão na prospecção de petróleo, é conhecido como AVO (Amplitude versus Offset). Existem alguns trabalhos realizando estudos semelhantes ao AVO em dados de radar, seja utilizando modificações das Equações de Zoeppritz (Cai e MacMechan, 1995), seja empregando os coeficientes de reflexão de Fresnel (Reppert et al, 2000). Os experimentos realizados no laboratório possuem total controle sobre as propriedades e dimensões dos meios físicos estudados, a menos do perfeito conhecimento do padrão de radiação das antenas em campo próximo (Radzevicius et al, 2003), porém isto não impediu que fossem obtidas curvas da variação das amplitudes medidas a diferentes afastamentos similares às calculadas a partir da Equação de Fresnel. Os levantamentos de seis (6) CMPs realizados em campo,

nas margens da Lagoa do Abaeté, permitiram que realizássemos as análises da variação de amplitude em função da separação fonte - receptor nos principais refletores. Os três CMPs levantados com a configuração TM (polarização paralela) revelaram um Ângulo de Brewster de 33° e uma razão entre as constantes dielétricas de 1,45 para o refletor que separa as camadas de areia seca e parcialmente saturada.

Método

1) Análise das Amplitudes :

As relações de amplitude das ondas incidentes obliquamente, conhecidas como coeficientes de reflexão de Fresnel, são dadas por:

Incidência Perpendicular

$$R_{\perp} = \frac{\cos \vartheta_i - \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \sin^2 \vartheta_i \right)} \right)}{\cos \vartheta_i + \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \sin^2 \vartheta_i \right)} \right)} \quad (1)$$

Incidência Paralela

$$R_{\parallel} = \frac{-\cos \vartheta_i + \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \sin^2 \vartheta_i \right)} \right)}{\cos \vartheta_i + \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \sin^2 \vartheta_i \right)} \right)} \quad (2)$$

Para melhor visualizar o arranjo de polarização, empregando antenas de radar, apresenta-se a figura 1 onde pode-se observar os dois casos de polarização das ondas eletromagnéticas: no primeiro momento, o campo elétrico é dito polarizado perpendicularmente, onde o campo elétrico, paralelo à maior dimensão da antena, é perpendicular ao plano de incidência (ver a figura 1a); e no segundo, o campo elétrico é dito polarizado paralelamente, onde o campo elétrico é paralelo ao plano de incidência (ver a figura 1b).



a) b)
Figura 1. Principais padrões de polarização das antenas: a) arranjo de aquisição CMP seguindo o padrão de polarização perpendicular das antenas; e b) polarização paralela. (Adaptado de Dourado et al. 2004).

Os coeficientes de reflexão (e transmissão) de Fresnel quantificam o comportamento das amplitudes dos campos eletromagnéticos ao cruzarem uma interface entre dois materiais de propriedades elétricas distintas. O livro texto de Jordan e Balmain (1968) aborda este assunto com maiores detalhes no desenvolvimento matemático.

Em geral, os coeficientes de reflexão e transmissão são quantidades complexas, e suas amplitudes e fases são função do ângulo de incidência. Na polarização paralela, o coeficiente de reflexão é igual a zero para um específico ângulo de incidência, conhecido como ângulo de Brewster:

$$\vartheta_B = a \tan \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \right) \quad (3)$$

O ângulo de Brewster é mais facilmente visualizado a partir das parcelas de magnitude e fase contidos na figura 2. Pela visualização gráfica, observa-se facilmente que o ângulo de Brewster só ocorre para o caso de disposição paralela das antenas. Quando o valor do coeficiente de Fresnel é unitário este se encontra no ângulo crítico, o que indica reflexão total da energia incidente.

Igualando a equação (2) à unidade, chega-se à relação que calcula o ângulo crítico:

$$\vartheta_C = a \sin \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \right) \quad (4)$$

As amplitudes das ondas refletidas dependem do ângulo de incidência do raio e das propriedades elétricas dos meios aos quais a interface corresponde à fronteira. Assim, quando as ondas eletromagnéticas incidem obliquamente na fronteira entre dois meios, como mostra a figura 2, a onda incidente (vinda do meio 1) forma um ângulo ϑ_i com relação à reta normal à interface e que contém o ponto de incidência. A onda refletida (viajando no meio 1) forma um ângulo ϑ_r com a mesma reta e a onda transmitida (refratada) faz um ângulo ϑ_t com a mesma reta referenciada. Vide Dourado et al (2004)

2) Análise das Velocidades :

A aquisição de dados de radar usando um arranjo do tipo CMP permite que seja possível determinar a velocidade de propagação da onda, usando análises de velocidades do tipo t^2-x^2

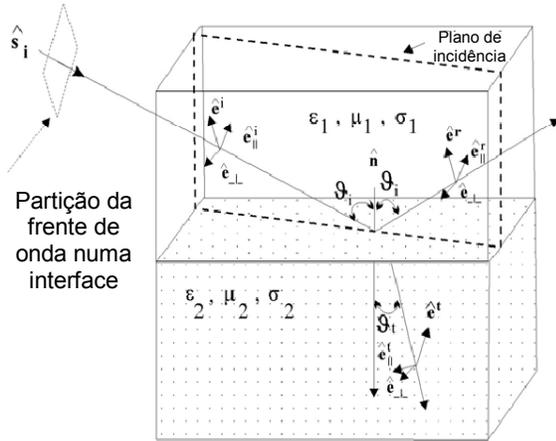


Figura 2. Esquema de partição da frente de onda numa interface plana. Adaptado de Daniels (2003).

A figura 3 ilustra um esquema para registrar dados com arranjo CMPs. A partir das análises de velocidades obtêm-se as velocidades RMS, correspondentes aos refletores considerados, e então, empregando a Eq. De Dix obtemos as velocidades Intervalares correspondentes aos pacotes compreendidos entre os refletores considerados. Vide os trabalhos de Botelho et al (2003) e Dourado et al (2004).

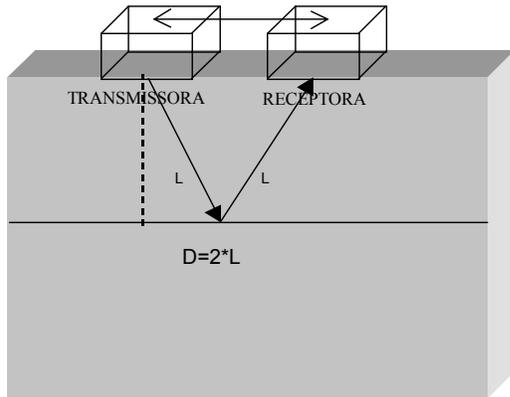


Figura 3. Esquema de trajeto da frente de onda no experimento da caixa ao simular um CMP.

Resultados :

1) Resultados Experimentais :

O experimento que envolveu hidrocarbonetos usou o modelo de duas camadas de areias com a camada superior saturada por óleo diesel e a inferior saturada por água (vide Fig.5), a análise de velocidade do refletor AA' forneceu uma velocidade de 16,12 cm/ns, de onde obtivemos a intervalar de 13,97 cm/ns. O refletor forte na base do radargrama, vide figura 4, correspondente à base da camada de areia saturada com água (20%), o

qual forneceu uma velocidade RMS de 10,46 cm/ns e uma intervalar de 6,68 cm/ns.

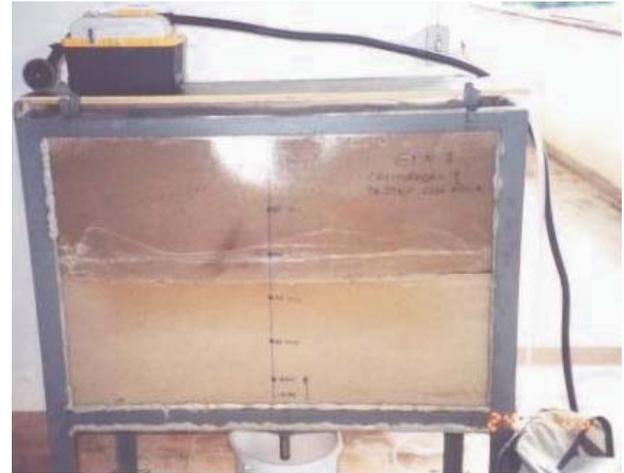


Figura 4 – Vista do modelo físico formado por uma camada superior saturada por óleo diesel e a camada inferior saturada com água.

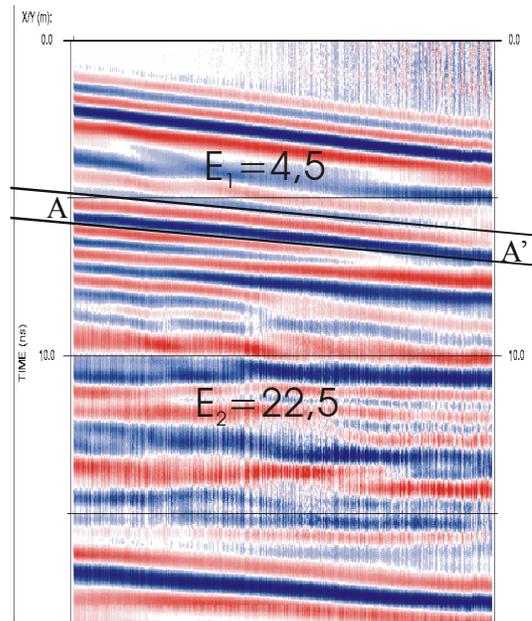


Figura 5. Radargrama do modelo de quatro fases com a indicação da reflexão (hipérbole) AA' estudada, a qual corresponde à interface óleo-água na cuba de areia.

Uma vez selecionada uma reflexão (hipérbole no arranjo CMP), a qual em nosso experimento é o refletor AA' mostrado na figura 5, a amplitude do refletor em cada traço está associada a um ângulo de incidência distinto, e o cálculo do valor de cada amplitude pode ser feita a partir da soma dos módulos dos valores máximos e mínimos (pico negativo) presentes na wavelet, os quais são obtidos com os recursos disponíveis em diversos

softwares. Em seguida deve-se corrigir os efeitos da divergência esférica na amplitude do sinal, multiplicando-se os valores das amplitudes medidas pelo valor referente ao trajeto percorrido pelo raio da frente de onda, a partir da antena fonte até a antena receptora. No caso de materiais arenosos, as perdas por absorção podem ser desprezadas. Com objetivo de comparar a curva gerada pelos valores das amplitudes medidas em função da separação fonte – receptor (ou então amplitude versus ângulo) com a previsão teórica fornecida pelas curvas teóricas de Fresnel, se faz necessário normalizar todas as amplitudes medidas em relação ao seu valor máximo e, posteriormente, realizar uma nova normalização com o valor fornecido pela curva teórica de Fresnel que tem o mesmo ângulo de afastamento.

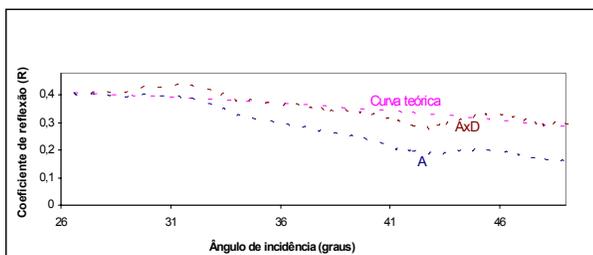


Figura 6. – Gráfico comparativo das amplitudes normalizadas e valores teóricos das curvas coeficiente de reflexão de Fresnel do modelo tetrafásico para a interface areia saturada com óleo/areia saturada com água com relação de constantes dielétricas dos meios de 22,5 / 4,5.

Com os resultados mostrados neste gráfico, percebe-se que em ambientes resistivos onde é possível se desprezar a absorção do meio é possível estudar o comportamento das amplitudes com o afastamento entre antenas transmissora e receptora, a partir das curvas de coeficiente de reflexão de Fresnel. No caso do modelo estudado, obtido com o padrão de polarização paralela, as pequenas dimensões da caixa, não foram suficientes para atingir ângulos de incidência maiores que 52°, impossibilitando que o ângulo de Brewster fosse visualizado no radargrama, uma vez que para a relação de constantes dielétricas 22,5/4,5, ele ocorreria nas proximidades de 69°.

2) Trabalhos de Campo

Para procurar avaliar a eficiência dos estudos dinâmicos apresentados anteriormente, alguns ensaios de múltiplo afastamento foram executados em uma região de dunas, mais precisamente, às margens da Lagoa do Abaeté, na parte norte da cidade de Salvador. Após inspeção visual da área, uma superfície foi escolhida para a execução dos levantamentos com o GPR. Os trabalhos com este equipamento geofísico consistiram de três aquisições CMP, onde o afastamento entre as antenas foi feito na direção paralela à margem da lagoa; uma seção seguindo o arranjo de aquisição de afastamento

constante, conforme apresentado na figura 7. Os ensaios CMP foram executados em cada um dos três pontos indicados na figura 7. Complementando os trabalhos, duas sondagens a trado foram executadas, indicadas por S1 e S2 na figura, para a determinação direta do nível do lençol freático.

Os levantamentos com o radar foram executados utilizando antenas não-blindadas de 200 Mhz, adotando-se uma janela de tempo de 150 ns para todos os levantamentos. O número de amostras por traços foi de 512. O espaçamento para coleta dos traços foi de 20 cm para os levantamentos de afastamento constante e 50 cm para os CMP's.

A litologia arenosa do ambiente escolhido para o estudo permitiu uma excelente resposta aos sinais de radar, entretanto os CMP's 3 e 4 não puderam ser utilizados para a avaliação do comportamento das amplitudes pois houve sobreposição entre a primeira reflexão e a onda direta no solo.

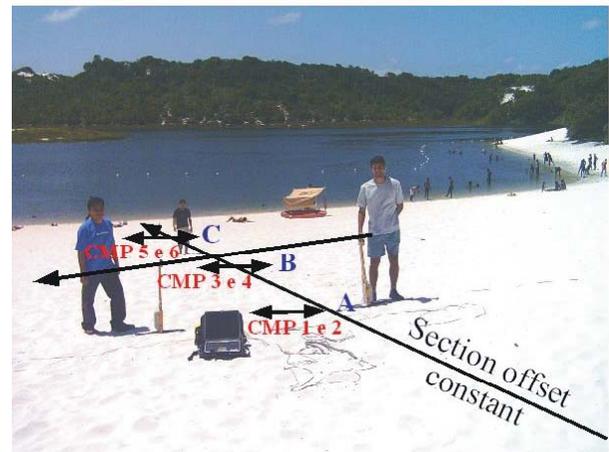


Figura 7. Área da Lagoa do Abaeté onde foram realizados os experimentos de campo com antenas de 200 Mhz.

Aplicando a metodologia desenvolvida neste trabalho, foi possível comparar os gráficos das curvas amplitude versus ângulo de incidência para ambos modelos de aquisição (paralela e perpendicular).

Nos gráficos apresentados na figura 8, logo abaixo dos respectivos radargramas, cujas amplitudes da primeira reflexão foram coletadas, encontram-se as curvas das amplitudes normalizadas com e sem correção da divergência esférica e a curva teórica para a relação entre constantes dielétricas apresentada no título de cada um dos gráficos.

A partir das análises de velocidades dos CMP's apresentados e das informações de profundidade do NA, obtidas com os radargramas de afastamento constante e das sondagens a trado, foi possível verificar a coerência dos valores encontrados para as constantes dielétricas dos meios vizinhos. Por exemplo, a partir da análise de

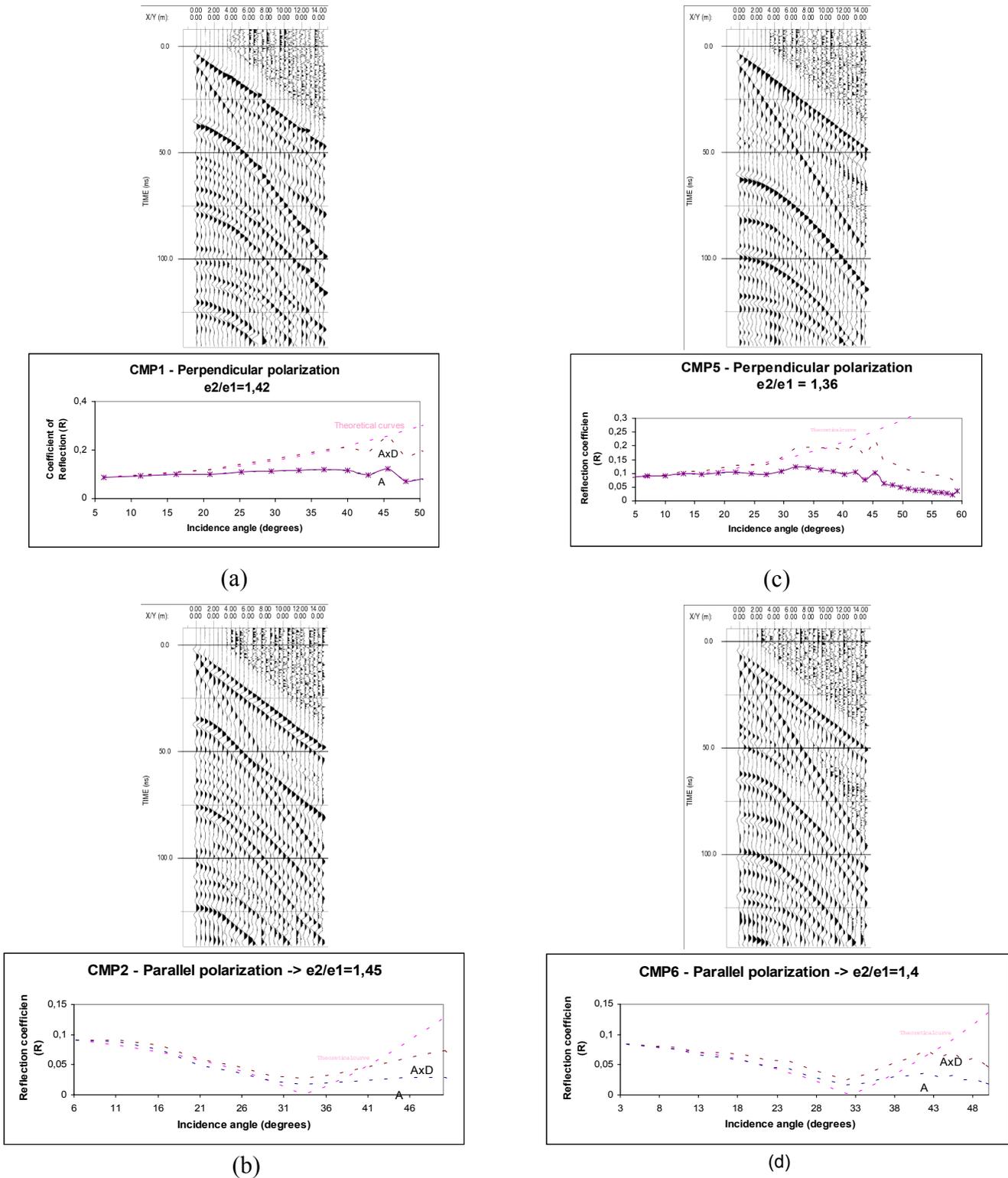


Figura 8. Radargramas sobrepostos aos seus respectivos gráficos que comparam o comportamento das amplitudes da primeira hipérbole de reflexão versus ângulo de incidência com curvas teóricas contruídas a

partir das equações de Fresnel. a) CMP1, empregando polarização perpendicular; b) CMP2, empregando polarização paralela; c) CMP5, empregando polarização perpendicular; e d) CMP6, empregando polarização paralela.

velocidade do CMP2, obteve-se a relação $e_2/e_1=1,56$. Pelo gráficos apresentados para os modelos de polarização paralela (figuras 8b e 8d), onde o valor do ângulo de Brewster foi detectado nas proximidades de 33° , corresponde a uma relação entre constantes dielétricas de 1,45. Somando-se a estes resultados, os levantamentos seguindo o arranjo de polarização perpendicular também forneceram curvas com relações entre constantes dielétricas próximo de 1,4, o que reforça a qualidade dos resultados da metodologia aplicada.

Conclusions

A partir dos estudos realizados em ambiente de laboratório observou-se que a velocidade de propagação do pulso de radar, fortemente controlada pela presença de água, decai de 15 cm/ns na areia seca (3% de umidade), para 5 cm/ns se atingirmos a saturação, onde a umidade é de 24%. Para ambientes arenosos, a saturação por hidrocarboneto somente causa pequenas variações (de 13 cm/ns para 15 cm/ns) na velocidade do pulso eletromagnético, por outro lado, se a areia estiver úmida, a mudança na velocidade do pulso é notável (de 4 cm/ns para 16 cm/ns).

As equações do cálculo dos coeficientes de reflexão de Fresnel permitem que as amplitudes coletadas em uma hipérbole de reflexão sejam comparadas com curvas teóricas de coeficientes de reflexão para diferentes relações de constantes dielétricas. Uma vez conhecendo a constante dielétrica do meio mais superficial, que pode ser calculada pelos métodos clássicos de análise de velocidade, a análise comparativa do caimento da curva de coeficiente de reflexão pode determinar a constante dielétrica do meio inferior. O processo de checagem deve ser interativo, testando diferentes relações de constantes dielétricas (e_2/e_1) para o modelo de polarização das antenas utilizado na aquisição, até se chegar à curva teórica que mais se aproxima dos valores coletados na hipérbole.

Nos estudos de campo foi possível utilizar os modelos de polarização perpendicular (CMP1 e CMP5) e paralela (CMP2 e CMP6) das antenas para determinação da relação entre constantes dielétricas dos meios vizinhos. Nos modelos de polarização paralela o ângulo de Brewster foi detectado nas proximidades de 33° , para ambos CMP's, correspondendo a uma relação entre constantes dielétricas de 1,45. No caso estudado, estas informações representam a passagem de uma camada de velocidade de 15 cm/ns para outra de 12 cm/ns, ou seja, um meio seco (umidade 1%) sobre uma camada com umidade de cerca de 7 % .

A metodologia apresentada neste trabalho nos permite avaliar a presença de óleo em um meio arenoso, não só pela análise de velocidade de propagação do pulso de radar como também pela mudança dos valores de amplitudes do refletor correspondente ao contato areia seca e areia úmida (franja capilar), denunciada na variação da razão entre constantes dielétricas dos meios em contato ou do ângulo de Brewster. Supondo que uma região com as mesmas características do ambiente estudado sofresse um derramamento de óleo que

proporcionasse uma diminuição da umidade de água de 7% para 3%, através da substituição da água por este segundo fluido, deixando retido nesta camada uma umidade de óleo de cerca 5%, a relação entre constantes dielétricas diminuiria para cerca de 1,1. O mesmo ocorreria com o ângulo de Brewster, que passaria de 33° para aproximadamente 17° .

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPQ a esta pesquisa, o qual se deu por meio do processo número 468048/00-6.

Referências

- BOTELHO, M. A. B., MACHADO, S. L., DOURADO, T. C., AMPARO, N. S. Experimentos laboratoriais com GPR (1GHz) em corpos arenosos para analisar a influência da água e de hidrocarbonetos na sua velocidade de propagação. (Eighth International Congress of The Brazilian Geophysical Society), 2003.
- CAI J., MCMECHAN, G. A. Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles. (Geophysics, vol. 60, n. 1, pp. 87-96), 1995.
- DANIELS, J. J., WIELOPOLSKI, L., RADZEVICIUS, S. J., BOOKSHAR, J. 3D GPR Polarization analysis for imaging complex objects: Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems, Proceedings of The Environmental and Engineering Geophysical Society, April 6-10, 2003.
- DAVIS, J.L., ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. (Geophysical Prospecting, vol. 37, pp. 531-551), 1989.
- DOURADO, T.C., BOTELHO, M.A.B., MACHADO, S.L. E AMPARO, N.S. Detecção de hidrocarbonetos em sedimentos arenosos analisando velocidade e amplitude dos pulsos eletromagnéticos (GPR), Rio Oil & Gás, Rio de Janeiro, 2004.
- JORDAN, E. C., BALMAIN, K. G. Electromagnetic waves and radiating systems. Prentice-Hall, NJ, pp. 139–144, 1968.
- RADZEVICIUS, S. J., CHEN, C. C., PETERS L. and Daniels J. J. Near-field radiation dynamics through FDTD modeling: Journal of Applied Geophysics, v. 52, p. 75-91, 2003.
- REPPERT, P. M., MORGAN, F. D., TOKSOZ, M. N. Dielectric constant determination using ground-penetrating radar reflection coefficients. (Journal of Applied Geophysics, vol. 43, n. 1-3, pp. 189-198), 2000.