



Geophysical Survey for the Study of Saturated Zones in Earth Dam, Quadrilátero Ferrífero Region, Brazil.

Jorge Roncato*, Guilherme Prosdocimi*, Fábio Miranda*, Juliano Vitorino*

*Neogeo Geotecnologia LTDA.

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 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

This case study used indirect geophysical methods (Electrorresistivity and GPR) for the indirect subterranean mapping in the tailings dam with the purpose of verifying possible ways of percolating water. Electrorresistivity, like GPR, is an indirect method of prospecting and is a very useful tool in the search of saturated regions. The use of geophysics is an effective way of minimizing costs, since mitigating actions can be performed with greater probability of success. The analysis of the GPR's images allowed the verification of the presence of attenuated zones that coincide, within the sections of Electrorresistivity, with a behavior characterized by more conductive zones, attached to a more resistive background. Both profiles (attenuated and / or conductive) revealed the existence of a percolation / saturation facilitating region. From the combined interpretation between geophysics and the direct instrumentation data (water level indicators and boreholes), a more advanced stage of the process, it is possible to perceive the relations between the interpreted materials and to correlate them to situations that are geotechnically possible and founded.

Introdução

Em 2015, a Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM) avaliou 710 barragens, as quais 19 apresentaram risco de rompimento. Outras 16 tiveram avaliação inconclusiva por falta de dados repassados pelas empresas. Das 35 barragens que não foram classificadas como seguras, oito delas representam alto potencial de dano ambiental. O caso recente do rompimento da barragem do Fundão, em Mariana – MG, assim como os eventos anteriores, marcam a necessidade de se aprimorar os métodos de inspeção e monitoramento a fim de dar uma maior confiança à certificação de segurança e reformulações nas questões relativas à gestão de barragens.

O monitoramento e inspeção de barragens são feitos por medições diretas e/ou indiretas, através de equipamentos instalados (auscultação) e por inspeção visual. Os instrumentos de auscultação mais usados são os medidores de deslocamentos, subpressão e vazões de percolação além do nível de carga hidráulica através dos

piezômetros. Devido à natureza pontual das medidas, esses equipamentos podem facilmente falhar em amostrar uma região de fraqueza e fenômenos de erosão interna (*piping*). É neste cenário que os métodos geofísicos têm muito a contribuir para a geotecnia de barragens. A geofísica gera imagens contínuas do interior da barragem e, portanto, apresenta uma maior capacidade de identificar problemas de erosões ou dissoluções localizadas. Essa ampla amostragem espacial é feita de forma não invasiva e reduz significativamente a quantidade de instrumentos tradicionais necessários para atingir um limite de segurança ou focaliza suas instalações nos locais de maior interesse e/ou zonas de fraqueza orientados pela geofísica. É importante ressaltar que os métodos geofísicos não substituem as medidas diretas, mas fornecem indicadores indiretos contínuos em 2D ou 3D que, uma vez calibrados com dados oriundos de investigações diretas, permitem uma avaliação espacial mais assertiva e de baixo custo.

Metodologias

O estudo realizado utilizou os métodos geofísicos da Eletrorresistividade por meio da técnica de campo do Caminhamento Elétrico (CE) e *Ground Penetrating Radar* (GPR). O mapeamento subterrâneo indireto ocorreu em uma barragem de terra com objetivo de verificar possíveis caminhos de percolação de água.

O arranjo utilizado para as aquisições de Caminhamento Elétrico foi o Dipolo-Dipolo uma vez que, após realização de testes de arranjos, o mesmo apresentou melhor razão sinal-ruído assim como satisfatória relação profundidade de investigação versus resolução lateral. O equipamento utilizado no trabalho foi o resistivímetro SAS4000 da fabricante Abem com configuração de 64 canais, espaçamento entre eletrodos variável e o *software* utilizado para o processamento dos dados foi o RES2DINV.

O equipamento utilizado para as aquisições de GPR foi o SIR3000 da fabricante GSSI, antena de 15,0 MHz do tipo MLF (*Multi Low Frequency*), em modo dinâmico. O processamento dos dados foi realizado no *software* ReflexW (Sandmeier), que permite aplicar todos os processos básicos e avançados para o tratamento de dados de GPR.

Foram realizadas 11 seções para cada método, adquiridas de modo sobreposto e espaçamento entre linhas de 12 metros para as seções paralelas aos taludes e 30 metros para as seções executadas de modo transversal aos taludes (Figura 1).

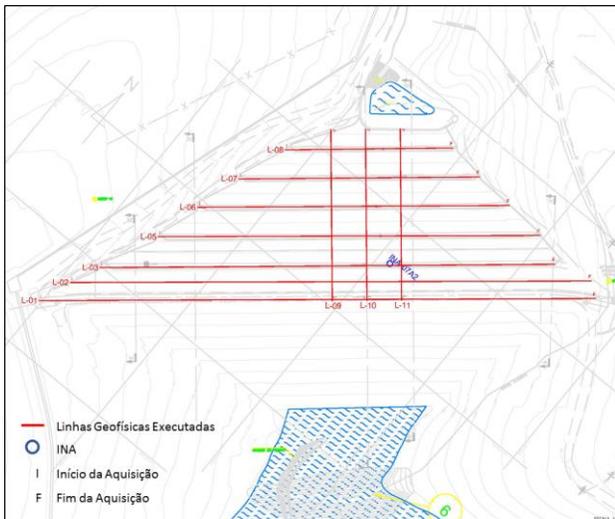


Figura 1: Mapa de Aquisições Geofísicas

Instrumentos de Auscultação

A auscultação disponível por meio de instrumentação geotécnica no barramento de contenção de rejeitos inclui piezômetros (PZ) e medidores de nível d'água (INA's). Chama-se auscultação de uma barragem ao conjunto de processos que visam a observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que constituem risco potencial às condições de sua segurança global. A barragem de rejeitos apresenta 8 piezômetros e 8 medidores de nível d'água (INAs) localizados ao longo do corpo do barramento e coincidentes com as linhas geofísicas.

Resultados

Por meio da análise das seções de Eletrorresistividade foi possível perceber a tendência superficial mais resistiva em praticamente todas as seções interpretadas. As altas resistividades, em subsuperfície, podem estar associadas a materiais de aterro, de composição menos argilosa, e/ou materiais cujos espaços estão predominantemente preenchidos por ar, o que acaba por aumentar a resistividade aparente nesses locais. Porções altamente resistivas ($> 5.000 \text{ ohm.m}$) podem indicar materiais mais arenosos e/ou não-saturados, sugerindo certa heterogeneidade em sua constituição.

Zonas de Resistividades Intermediárias (entre 400 e 2000 ohm.m), que aparecem em regiões intermediárias dos perfis e com certa continuidade lateral, podem estar relacionadas a faixas argilosas constituintes do maciço. Tais porções, quando apresentam maior abrangência em subsuperfície (e.g. L-06), podem indicar, além de porções mais argilosas do aterro, zonas com relativo preenchimento dos grãos por água e/ou presença de certo grau de umidade (zona de franja).

Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR) com valores abaixo de 200 ohm.m apareceram nos perfis de modo isolado em subsuperfície ou de maneira mais

persistente e concentrada nas regiões mais inferiores. Em profundidade, tais zonas mostraram-se com maior frequência/expressão lateral e podem ser correlacionadas à fundação e/ou funcionamento do tapete drenante, apresentando superfície regular em algumas seções assim como uma zona irregular em outras.

A Figura 2 apresenta exemplos de seções de Caminhamento Elétrico em que é possível visualizar tais compartimentações e síntese das interpretações mencionadas, evidenciando as características geolétricas de cada feição analisada e sua correlação com feições constituintes do barramento.

As correlações entre as respostas geofísicas e as feições pertencentes ao barramento foram possíveis devido à análise comparativa com o perfil de materiais constituintes da estrutura, como pode ser observado na Tabela 1:

Tabela 1: Comparativo de Resultados Geofísicos e Materiais Constituintes do Barramento/Condições de Saturação.

Material/Condição de Saturação	Resistividade (ohm.m)
Aterro (Saprolito) e/ou Zonas Não-Saturadas	> 2.000
Aterro Silto-Argiloso e/ou Zonas com Umidade	Entre 400 e 2.000
Aterro Argiloso e/ou Zonas com Umidade	Entre 400 e 1.400
Fundação/Tapete Drenante e/ou Zonas Saturadas	< 200

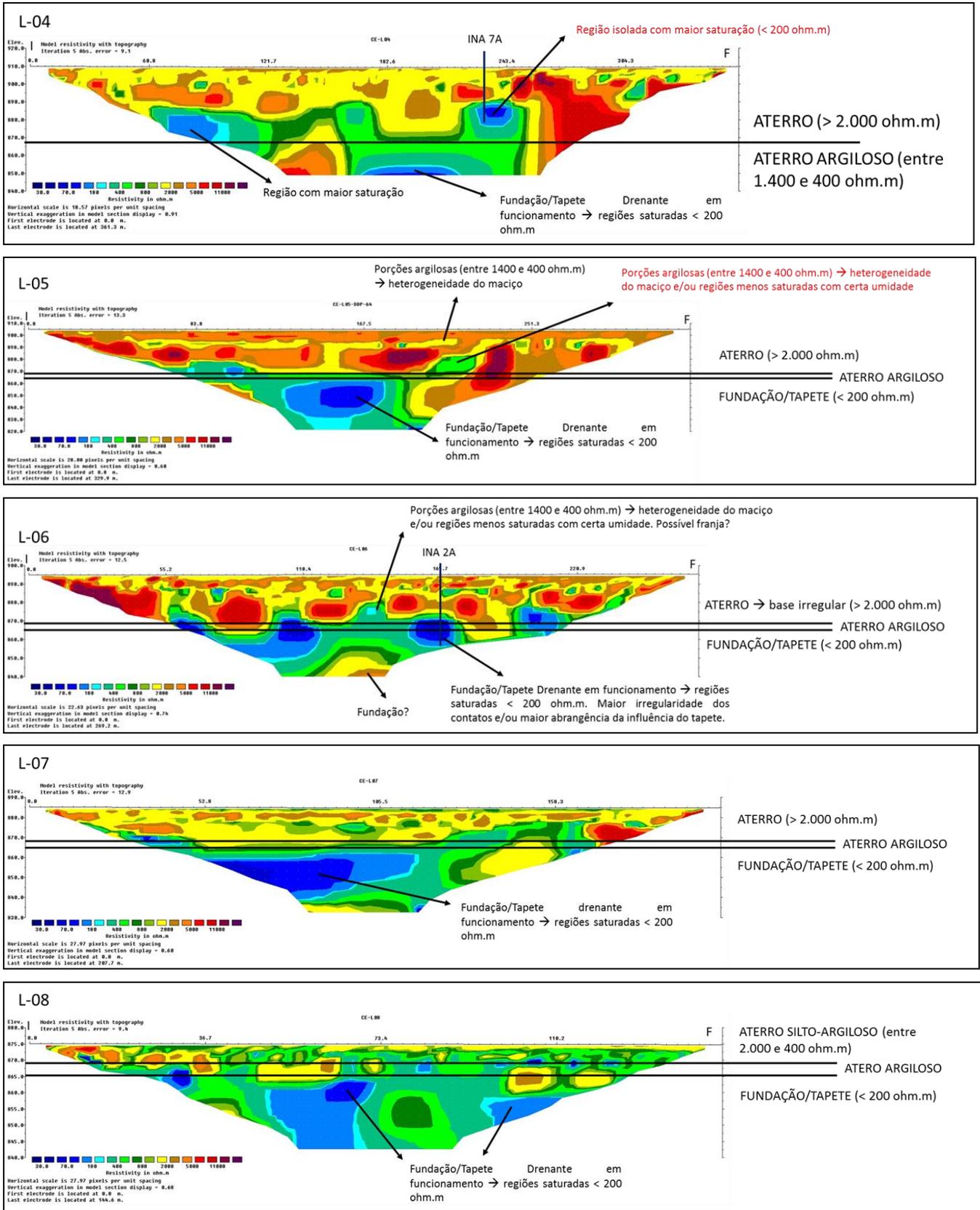


Figura 2: Seções de Caminhamento Elétrico.

A análise das seções de GPR permitiu a diferenciação em estratos relacionados às características dos padrões de refletor segundo a terminologia de definição e descrição de radar fácies de Mitchum *et al.* (1977), Campbell (1967) e Allen (1982). Os estratos superficiais, com padrão de reflexão caracterizado por refletor horizontalizados, contínuos a moderadamente contínuos e paralelos, podem estar associados às diferentes fases de compactação do aterro. A medida que o padrão de refletor torna-se descontínuo, por vezes caótico, em profundidade, os estratos basais podem ser associados ao terreno natural e/ou materiais rochosos com maior grau de alteração/saturação, possivelmente associados à fundação. As zonas atenuadas, principalmente encontradas no segundo pacote geofísico interpretado, podem estar associadas a uma maior alteração do material, presença de material argiloso bem como possível presença de água/umidade preenchendo os grãos. Tais interpretações podem ser visualizadas na Figura 3.

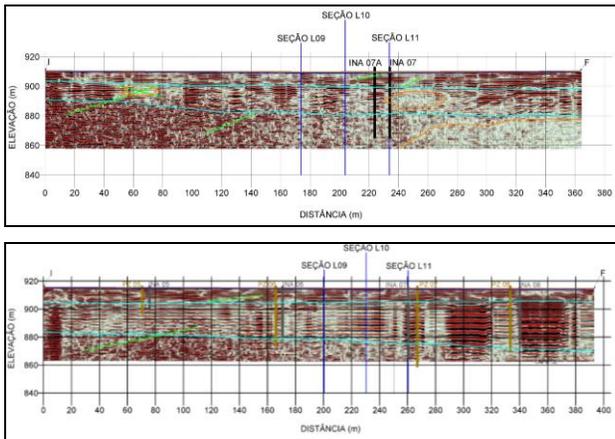


Figura 3: Seções de GPR com delimitação de horizontes geofísicos interpretados em virtude do padrão de refletor associados.

A análise do GPR foi de suma importância para corroborar com as interpretações realizadas pelo método elétrico. Os contatos geofísicos interpretados nas seções de GPR diferenciando pacotes com diferentes padrões de reflexão coincidiram satisfatoriamente com os pacotes geofísicos interpretados nas seções de Caminhamento Elétrico, confirmando a existência de materiais com características físicas distintas e que, portanto, puderam ser diferenciados e definidos pelos métodos indiretos. Os pacotes mais horizontalizados e contrastados nas porções superiores do GPR coincidem com os pacotes mais resistivos também das porções superiores dos perfis de CE, sugerindo correlação com as diferentes fases de compactação do aterro. Já o pacote caracterizado por maior atenuação do sinal e refletor com padrão descontínuo/caótico nas porções basais das seções de GPR coincidem com as porções menos resistivas nos perfis de CE, sugerindo uma relação entre tais características geofísicas e materiais com certo grau de saturação/umidade bem como presença de material argiloso. A Figura 4 apresenta um comparativo entre os diferentes métodos utilizados, evidenciando a satisfatória

correlação entre as interpretações elaboradas e descritas.

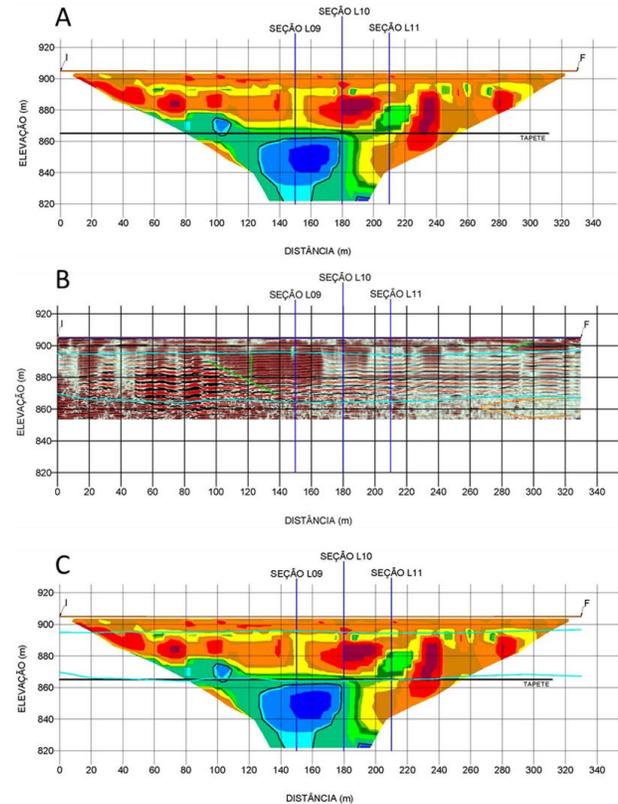


Figura 4: Interpretação integrada dos métodos. A: Seção de CE com interpretação; B: Radargrama com interpretação dos estratos associados aos diferentes padrões de refletor; C: Interpretação integrada evidenciando a satisfatória relação entre os estratos geofísicos encontrados no GPR e os pacotes de diferentes resistividades nas seções de CE.

Modelos de Materiais

O conjunto de informações obtidas a partir dos dados de instrumentação direta e sondagens permitiram a construção de modelos de materiais. Os dados de auscultação foram essenciais para referenciar o posicionamento de anomalias geoeletricas interpretadas a um determinado tipo de material nas seções de CE.

Tais modelos diferenciaram 3 (três) tipos de materiais: aterros, dreno e fundação (Figura 5). É importante ressaltar que os dados de instrumentos diretos balizaram os contatos entre os materiais descritos.

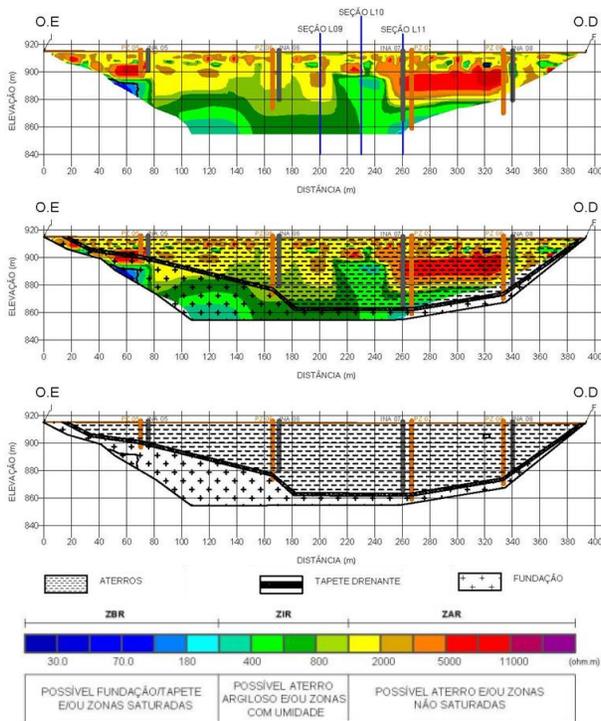


Figura 5: Modelo de materiais construído por meio da integração entre dados geofísicos e balizamento com dados de instrumentação direta.

Conclusões

As seções de eletrorresistividade permitiram a diferenciação em zonas geofísicas em virtude da magnitude dos valores de resistividade aparente medidos. Zonas de Alta Resistividade Aparente (ZAR) e Zonas de Resistividade Intermediária (ZIR) podem ser relacionadas a materiais pertencentes a diferentes fases de aterro heterogêneo antropicamente lançado. Valores mais altos de resistividades aparentes podem estar relacionados a materiais não-saturados com preenchimento dos espaços por ar e/ou cuja composição é mais arenosa enquanto valores intermediários de resistividade aparente podem ser associados a materiais argilosos e/ou com certo grau de umidade (zona de franja). Zonas de Baixa Resistividade aparente (< 200 ohm.m) relacionam-se a porções com maior acúmulo de materiais saturados cujos espaços entre os grãos estão preenchidos por água. Em profundidade, tais porções correlacionam-se possivelmente à fundação e/ou funcionamento do tapete drenante.

A análise das seções de GPR permitiu a diferenciação em estratos relacionados às características dos padrões de refletores. Por meio da verificação do paralelismo, continuidade e amplitude das reflexões foi possível relacionar os pacotes geofísicos interpretados a materiais de aterro bem como materiais pertencentes ao substrato natural. Os contatos geofísicos interpretados nas seções de GPR diferenciando pacotes com diferentes padrões de reflexão coincidiram satisfatoriamente com os contatos geofísicos interpretados nas seções de Caminhamento Elétrico, corroborando com os resultados esperados. Zonas de atenuação de sinal nas seções de

GPR também apresentaram grande correlação com porções de baixa resistividade elétrica nas seções de Caminhamento Elétrico (CE), confirmando, novamente, a necessidade de dados comparados e construção de uma interpretação com informações integradas.

A interpretação conjunta dos métodos geofísicos faz-se necessária a partir do momento que os métodos trabalham com princípios físicos diferenciados, comparando e confirmando feições correspondentes ou calcando possíveis discordâncias que possam ocorrer.

Referências

- Allen, J. R. L., 1982. Sedimentary structures: their character and physical basis. Vol. 1, Developments in sedimentology, Vol. 30 A. Amsterdam, Elsevier: 593 p;
- Campbell, C. V., 1967. Lamina, laminaset, bed and bedset. *Sedimentology*, 8, 7-26;
- Mitchum, R. M.; Vail, P. R.; Sangree, J. B. 1977. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: Payton, C. E. (Ed), *Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir 16, 117-123.