



MODELAGEM DE DADOS DE ELETRORRESISTIVIDADE NO MONITORAMENTO DE BARRAGENS

Miqueias Silva (BCMT, UFRJ)* e Gleide Alencar do Nascimento Dias (IGEO,UFRJ)

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.

Resumo

A tragédia envolvendo o rompimento de duas barragens em Mariana (MG), Brasil, trouxe à tona a segurança dessas estruturas, que são parte integrante da mineração em todo o mundo. O processamento de minérios gera resíduos que são estocados em lagoas de decantação, ou de rejeitos, criadas a partir da construção de barragens denominadas barragens de rejeito. A constante manutenção dessas estruturas é imprescindível, uma vez que um acidente eventual pode gerar danos de proporções catastróficas. Geralmente os métodos geofísicos como o da Eletrorresistividade (ER) é utilizado no monitoramento de barragens e para um melhor entendimento das respostas das pseudo-seções de resistividade aparente foram modeladas diferentes situações para o monitoramento do processo de acúmulo de água e ou sedimentos. Sete (7) modelos geoeletrônicos foram feitos através do programa RES2DMOD da Geotomo Softwares usando o arranjo Dipolo-dipolo com grande variedade de litologias e resistividades, representação de fissuras na barragem, possíveis pontos de infiltração, etc. Os resultados mostram satisfatoriamente a correlação das pseudo-seções de resistividade com o modelo proposto.

Introdução

Ensaio geofísicos são extremamente úteis nas fases pré e pós construção de barragens. Em uma pré fase os métodos geofísicos são utilizados para os estudos de caracterização da natureza geológica do terreno onde a barragem será implantada, fornecendo informações relevantes para a avaliação da viabilidade da construção. E na fase pós são utilizados para o monitoramento do processo de acúmulo de resíduos em uma lagoa de decantação. De forma geral a aplicação de métodos geofísicos tanto no corpo da barragem quanto na área submersa permite gerar um conjunto de dados que contribui efetivamente para a maior segurança das barragens. A eletrorresistividade e a refração sísmica são os métodos geofísicos mais indicados para aplicação na fase inicial do projeto. Quando já instalados a barragem e o lago de decantação, ou o reservatório de

água, o monitoramento da obra passa a ser fundamental, e neste caso ensaios de eletrorresistividade e potencial espontâneo, executados no corpo da barragem passam a ser de extrema relevância. Os rejeitos são resíduos de mineração que resultam dos processos de beneficiamento a que se submetem os minérios, visando a redução e regularização da granulometria dos grãos. A maioria dos rejeitos de minério de ferro é considerada granular, com baixa permeabilidade, boas condições de drenagem e resistência e baixo potencial poluidor, cujo comportamento geotécnico é determinado por essas características e pela forma de deposição. A sua disposição pode ser feita: em superfície, em escavações subterrâneas e em ambientes subaquáticos. A disposição em superfície é a mais aplicada, podendo o material ser disposto em barragens ou diques; em pilhas de rejeito se o material estiver na forma sólida; ou na própria mina, em áreas já lavradas ou minas abandonadas. Os diques construídos em áreas planas ou pouco inclinadas, e as barragens construídas em vales, para servirem de bacias de contenção de rejeitos são normalmente chamados de barragens de rejeito. A construção de barragens de rejeitos é o procedimento mais implementado pelas mineradoras. Podem ser empregados três métodos para a construção de barragens de rejeito alteadas com o próprio rejeito (Figura 1)

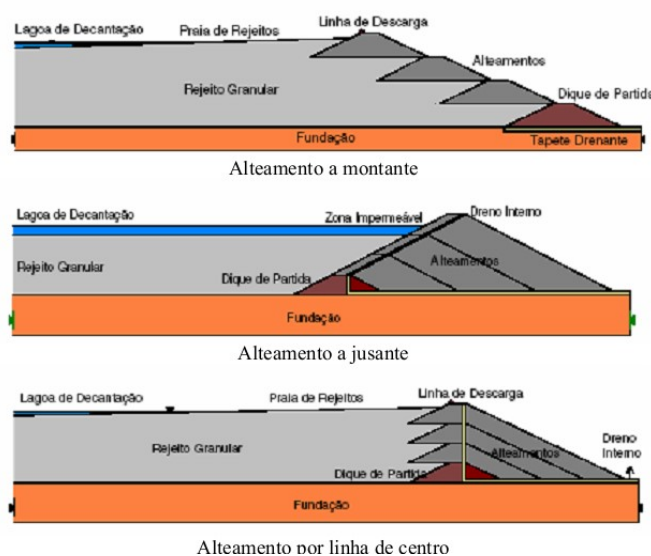


Figura 1 – Métodos construtivos de barragens de rejeito (Albuquerque Filho 2004 apud Araújo, 2006).

Método ER

O método geofísico da ER emprega uma corrente elétrica artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados A e B), com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade aparente em subsuperfície e, consequentemente, a resistividade real através do processo de inversão (Figura 2). A resistividade (e seu inverso, a condutividade) de solos e rochas pode ser afetada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, teor em água e natureza dos sais dissolvidos, o que permite a ampla aplicação do método em estudos ambientais e hidrogeológicos.

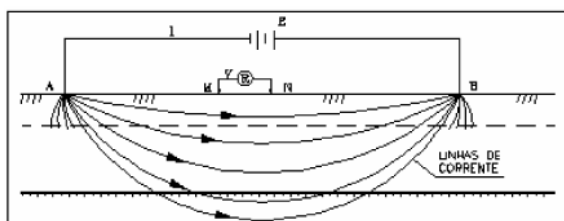


Figura 2 – Desenho esquemático do método Eletrorresistividade, Lago et al. (2006).

Da Lei de Ohm, define-se que a relação entre a resistividade (ρ) e a resistência (R) de um condutor homogêneo, de forma cilíndrica ou prismática, é dada pela equação:

$$R = (\rho \cdot L) / A \text{ (ohms)}$$

A resistividade de um material é definida como a resistência em ohms entre as faces opostas de um cubo unitário do material. Para um cilindro condutor de resistência R, comprimento L e área de seção transversa. A sendo a unidade de medida no S.I deste método o Ohm-m. A resistividade ρ é dada por:

$$\rho = (R \cdot A) / L \text{ (ohm.m)}$$

Portanto, a dimensão da resistividade é o produto de uma resistência elétrica por uma longitude; em função disto, a unidade de resistividade no sistema SI será ohm.m. No método da eletrorresistividade existem várias técnicas de levantamentos de campo, divididas basicamente em sondagem elétrica e caminhamento elétrico. No caminhamento elétrico de arranjo dipolo-dipolo, os eletrodos de corrente A e B possuem o mesmo espaçamento dos eletrodos de potencial M e N, sendo que a profundidade de investigação cresce com a separação entre os eletrodos de corrente e potencial. As medidas que são feitas em várias profundidades de investigação, no caso correspondem aos níveis n=1,2,3,4 e 5 e são atribuídas na intersecção das linhas que partem a 45° dos centros AB e MN (Telford et al., 1990).

Programa RES2DMOD

O RES2DMOD é um programa de livre utilização fornecido juntamente com o RES2DINV. Adota o algoritmo desenvolvido por Dey & Morrison (1979), com algumas melhorias. O programa calcula a pseudo-seção teórica de resistividade elétrica aparente para um modelo 2-D de subsuperfície definido pelo usuário (Loke, 2002). O RES2DMOD aceita diversos arranjos tais como o Schlumberger, Wenner (alfa, beta e gama), gradiente, Polo-Polo, Polo-Dipolo e Dipolo-Dipolo, sendo útil para a avaliação dos mesmos e das respectivas respostas frente às diversas simulações de modelos de subsuperfície. Para a simulação do uso do método ER o cálculo das resistividades aparentes pode ser fundamentado no princípio das diferenças finitas ou de elementos finitos. A primeira é mais rápida, enquanto que a segunda deve ser empregada quando for aplicada correção topográfica nos dados. Os modelos 2-D construídos pelo programa estão baseados no método de diferenças finitas, o qual divide uma subsuperfície em um número de blocos utilizando uma malha retangular. O modelo da malha tem N-1 colunas e M-1 linhas de blocos retangulares. Os blocos podem ter diferentes valores de resistividade (ρ_{ij}). Através do uso de uma malha suficientemente fina, estruturas geológicas complexas e alvos arqueológicos podem ser modelados. O programa usa uma malha com dois ou quatro nós horizontais por unidade de espaçamento entre eletrodos para um arranjo de vários eletrodos. O Programa exige ainda que se forneçam os valores de resistividade dos blocos retangulares através de comandos realizados manualmente. Essa versão do RES2DMOD fornece certa quantidade de modelos pré-estabelecidos, os quais o usuário faz uso para se familiarizar com os resultados que o software fornece. Ao escolher um dos modelos prévios o usuário pode calcular de imediato as resistividades aparentes do arquivo escolhido. A partir desses modelos preliminares o usuário pode fazer alterações para modelos mais sofisticados. O usuário pode utilizar modelos com no máximo 151 eletrodos (2 nodes por unidade de espaçamento de eletrodo) ou 75 eletrodos (4 nodes por unidade de espaçamento de eletrodo).

Modelagem

Foi modelado contraste entre valores de resistividade de possíveis zonas mais saturadas com zonas menos saturadas, onde pudessem ocorrer falhas na estrutura da barragem caracterizadas por fluxo hídrico. Os 7 modelos geoeletricos de barragens utilizados nesse trabalho foram para que possa gerar pseudo-seções de resistividade, esses são baseados nos modelos da Figura 3, os intervalos de resistividade dos materiais geológicos são fundamentados de Camarero (2016).

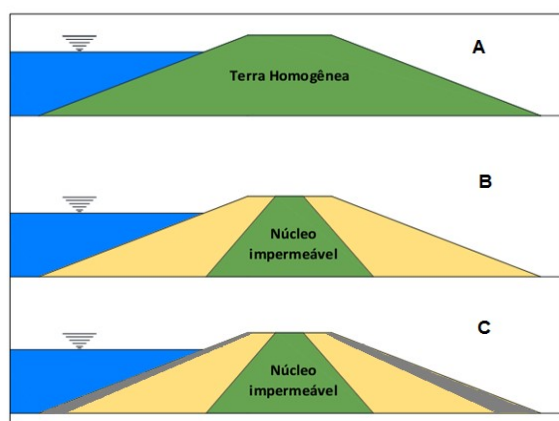


Figura 3 – Barramentos de terra usuais: a) Barragem de terra homogênea; b) Barragem de terra zonada com núcleo de material com menor coeficiente de permeabilidade relativo c) Barragem de terra zonada com Enrocamento e núcleo de material com menor coeficiente de permeabilidade relativo (Modificado de Camarero, 2016).

1° MODELO GEOELÉTRICO – TERRA HOMOGÊNEA

Para o modelo 1 de terra homogênea foi utilizado um modelo padrão disponível no diretório do RES2DMOD (MODEL101). Este foi alterado para que ficasse adequado ao modelo de barragem proposto (Figura 4).



Figura 4 – Modelo de Barragem de terra homogênea.

Características do modelo 1 terra homogênea: Numero de camadas: 4; Espessura total: 18 m; Distância do levantamento: 100 m; Quantidade de linhas: 2 na Direção Norte – Sul e 1 na direção Leste – Oeste); Espaçamento entre as linhas: 3 m; Quantidade de Eletrodos: 101; Espaçamento entre os eletrodos: 1 m; Níveis de Resistividade Aparente: 24; Numero de modelos de resistividade: 8. A Tabela 1 apresenta os parâmetros físicos utilizados em todos os modelos geoeletricos.

Tabela 1 - Parâmetros físicos.

Litologia	Espessura	Resistividade (ohm.m)
Camada de seixo e areia	8	5000
Laterito	1	10000
Cascalho	4	1700
Marga	5	2300
Argila		10-200

compactada		
Água		30-50

2° MODELO GEOELÉTRICO – TERRA ZONADA

Para o modelo 2 de terra zonada foi utilizado um modelo padrão disponível no diretório do RES2DMOD (MODELEQ). Este foi alterado para que ficasse adequado ao modelo de barragem proposto (Figura 5). Esse segue parâmetros do modelo 1.



Figura 5 – Modelo de barragem de terra zonada com núcleo de material com menor coeficiente de permeabilidade relativo.

3° MODELO GEOELÉTRICO – TERRA COM ENROCAMENTO

Para o modelo 3 de terra zonada foi utilizado um modelo padrão disponível no diretório do RES2DMOD (MODELEQ). Este foi alterado para que ficasse adequado ao modelo de barragem proposto (Figura 6). Esse segue parâmetros do modelo 1.



Figura 6 – Modelo de barragem de terra com enrocamento com núcleo de material com menor coeficiente de permeabilidade relativo.

Resultados

O modelo para a aquisição dos dados foi baseado em linhas seguindo as direções norte – sul e leste – oeste como representado na Figura 7.

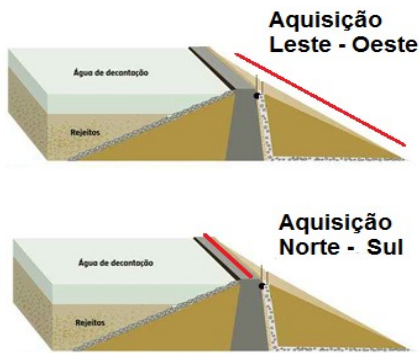


Figura 7 – Modelo de barragem apresentando as linhas de aquisição dos dados geoeletricos (vermelho) nas direções norte – sul e leste – oeste.

LEVANTAMENTOS DIREÇÃO NORTE – SUL PARA OS MODELOS GEOELÉTRICOS 1,2 E 3.

Modelo 1 – Barragem de Terra.

Modelo de barragem de terra com 4 camadas (verde claro, vermelho, verde e laranja) representado pela Figura 8. Na Figura 9 é mostrado o resultado da pseudo-seção de resistividade o qual mostra as camadas completamente planas sem qualquer variação longitudinal.

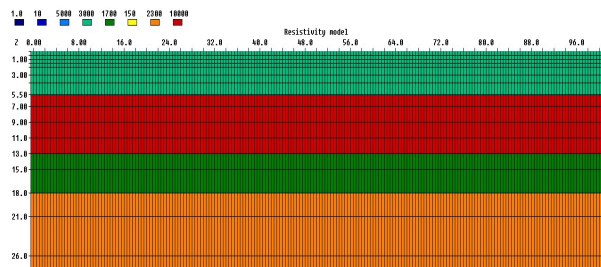


Figura 8 – Modelo de barragem de terra com 4 camadas (verde claro, vermelho, verde e laranja).

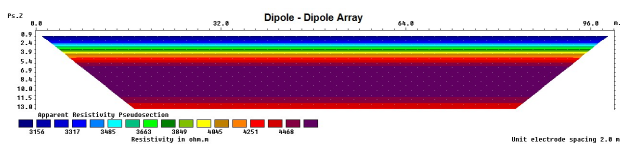


Figura 9 – Modelo de barragem de terra com 4 camadas (verde claro, vermelho, verde e laranja).

Modelo 2 – Barragem de Terra Zonada.

Modelo de barragem de terra zonada com 5 camadas (verde claro, amarelo, vermelho, verde e laranja) e representado pela Figura 10. Na Figura 11 é mostrado o resultado da pseudo-seção de resistividade, na resistividade em azul essa apresenta uma forma curvada

nas bordas da pseudo-seção devido ao alto valor de resistividade do modelo geoeletrico.

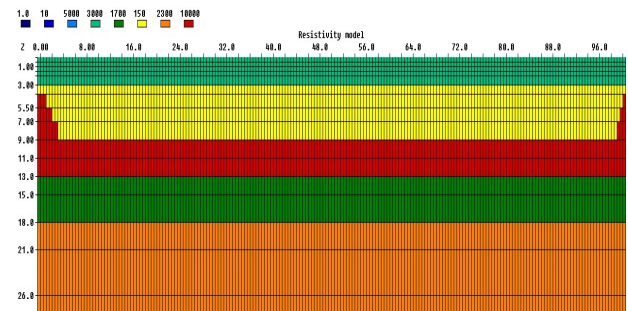


Figura 10 – Modelo de barragem de terra zonada com 5 camadas (verde claro, amarelo, vermelho, verde e laranja).

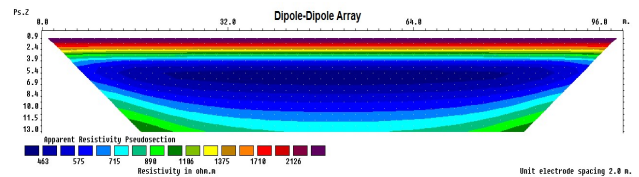


Figura 11 – Modelo de barragem de terra com 5 camadas (verde claro, amarelo, vermelho, verde e laranja).

Modelo 3 – Barragem de Terra Zonada Com Enrocamento.

Modelo de barragem de terra zonada com enrocamento composta por 6 camadas (azul claro, verde claro, amarelo, vermelho, verde e laranja) e representado pela Figura 12. Na Figura 13 é mostrado o resultado da pseudo-seção de resistividade, na resistividade em azul essa apresenta uma forma curvada nas bordas da pseudo-seção devido ao alto valor de resistividade do modelo geoeletrico.

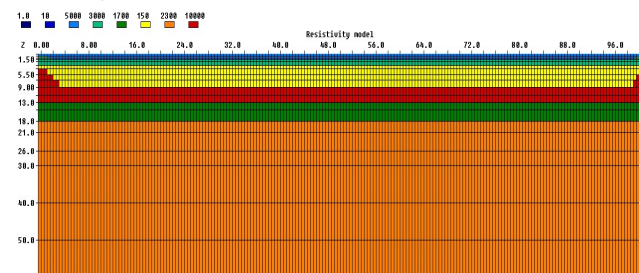


Figura 12 – Modelo de barragem de terra zonada com enrocamento composta por 6 camadas (azul claro, verde claro, amarelo, vermelho, verde e laranja).

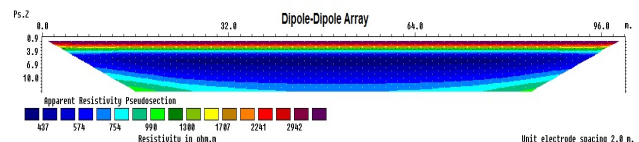


Figura 13 – Modelo de barragem de terra zonada com enrocamento composta por 6 camadas (azul claro, verde claro, amarelo, vermelho, verde e laranja).

LEVANTAMENTOS DIREÇÃO LESTE – OESTE PARA OS MODELOS GEOELÉRICOS 1,2 E 3.

Modelo 4 – Barragem de Terra.

Modelo de barragem de terra com 4 camadas (azul, vermelho, verde, laranja e verde claro) e representado pela Figura 14. Na Figura 15 é mostrado o resultado da pseudo-seção de resistividade, na parte direita é verificada a degradação dos valores de resistividade correspondendo às bordas da barragem.

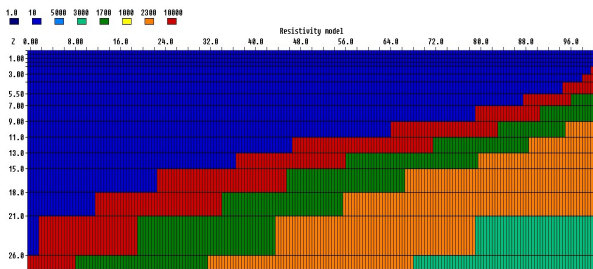


Figura 14 – Modelo de barragem de terra composta por 5 camadas (azul , vermelho, verde , laranja e verde claro).

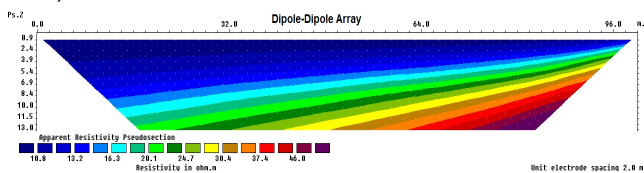


Figura 15 – Modelo de barragem de terra composta por 5 camadas (azul , vermelho, verde , laranja e verde claro).

Modelo 5 – Barragem de Terra Zonada.

Modelo de barragem de terra zonada composta por 5 camadas (azul escuro, vermelho, verde, laranja e verde claro) e camada interna (amarelo) ilustrando o zoneamento, Figura 16. Na Figura 17 é mostrado o resultado da pseudo-seção de resistividade.

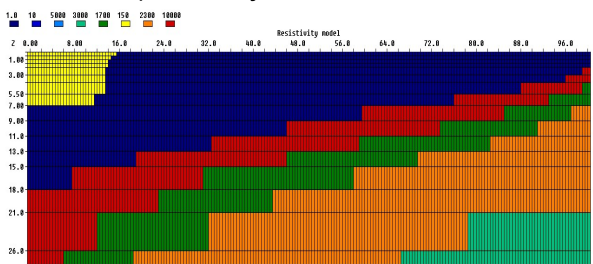


Figura 16 – Modelo de barragem de terra zonada composta por 5 camadas (azul , vermelho, verde , laranja e verde claro) e com camada interna (amarelo) ilustrando o zoneamento.

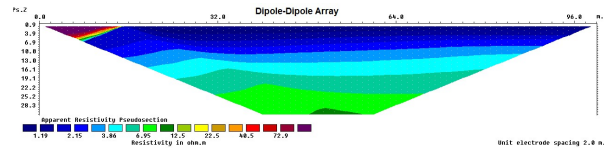


Figura 17 - Modelo de barragem de terra zonada composta por 5 camadas (azul , vermelho, verde, laranja e verde claro) e com camada interna (amarelo) ilustrando o zoneamento.

Modelo 6 – Barragem de Terra Com Enrocamento.

Modelo de barragem de terra zonada com enrocamento composta por 6 camadas (azul claro, azul escuro, vermelho, verde, laranja e verde claro) e camada interna (amarelo) ilustrando o zoneamento, Figura 18. Na Figura 19 é mostrado o resultado da pseudo-seção de resistividade, o enrocamento é apresentado sem a fissura.

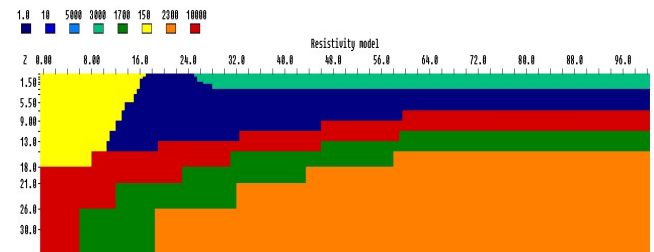


Figura 18 – Modelo de barragem de terra zonada composta por 6 camadas (azul claro, azul , vermelho, verde , laranja e verde claro) e com camada interna (amarelo) ilustrando o zoneamento.

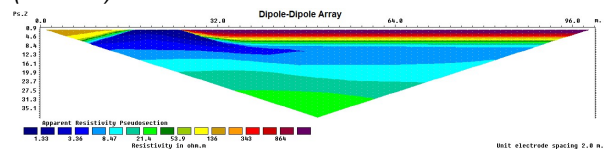


Figura 19 – Modelo de barragem de terra zonada composta por 6 camadas (azul claro, azul , vermelho, verde , laranja e verde claro) e com camada interna (amarelo) ilustrando o zoneamento.

Modelo 7 – Barragem de Terra Com Enrocamento (Apresentando Fissura)

Modelo de barragem de terra zonada com enrocamento composta por 6 camadas (azul claro, azul escuro, vermelho, verde, laranja e verde claro), fissura (azul) cortando a primeira camada e camada interna (amarelo) ilustrando o zoneamento. Figura 20. Na Figura 21 é mostrado o resultado da pseudo-seção de resistividade, a fissura gera uma anomalia na parte central da pseudo-seção.

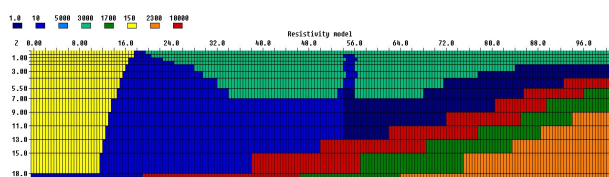


Figura 20 – Modelo de barragem de terra zonada com enrocamento composta por 6 camadas (azul claro, azul escuro, vermelho, verde, laranja e verde claro), fissura (azul) cortando a primeira camada e camada interna (amarelo) ilustrando o zoneamento.

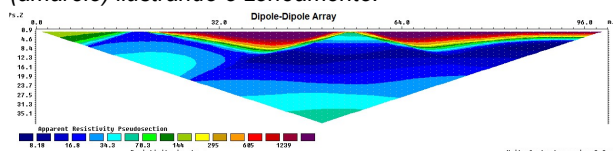


Figura 21 – Modelo de barragem de terra zonada com enrocamento composta por 6 camadas (azul claro, azul escuro, vermelho, verde, laranja e verde claro), fissura (azul) cortando a primeira camada e camada interna (amarelo) ilustrando o zoneamento.

Conclusão

Os modelos sintéticos criados para o caso de levantamentos geoeletricos em barragens de contenção de rejeitos demonstram ter uma boa resposta quando comparados com modelos reais, as configurações de arranjos utilizadas nos modelos sintéticos foram as mesmas utilizadas em levantamentos de campo e os resultados se mostraram bem próximos com o da realidade. Com relação a utilização do software de modelagem escolhido para este estudo, os resultados obtidos com o método das diferenças finitas, através do programa de modelagem direta RES2DMOD, versão livre, demonstraram ser uma excelente ferramenta que pode auxiliar no dimensionamento de levantamentos de campo nas etapas de processamento e interpretação qualitativa e quantitativa de dados de eletrorresistividade através da técnica do caminhamento elétrico.

Referências

ARAÚJO, C. B. 2006. Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, Setembro.

CAMARERO, P. L. 2016. Análise de Integridade Física de Barragens de Terra a partir da Integração do Método Geofísico da Eletrorresistividade com Ensaio Geotécnicos. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

DEY, A. & MORRISON, H. F. 1979. Resistivity Modelling For Arbitrary Shaped Two Dimensional Structures.

Geophysical Prospecting, 27, 1020-1036.

LAGO, A. L; ELIS, V. R; GIACHETI, H. L. 2006. Aplicação Integrada de Métodos Geofísicos em uma Área de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos em Bauru-SP. Revista Brasileira Geofísica. Vol. 24 no. 3. São Paulo July/Sept.

LOKE, M. H. 2002. RES2DMOD ver. 3.01 for Windows 95/98/Me/2000 and NT – Rapid 2D Resistivity Forward Modelling Using The Finite-Difference and Finite-Element Methods. M. H. Loke Software User's Manual.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. 1990. Applied Geophysics, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge.