

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA
INSTITUTO DE SISTEMAS E ROBÓTICA

**MÉTODOS MATEMÁTICO E COMPUTACIONAL
APLICADOS A PROSPECÇÃO GEOELÉTRICA COM
ESTRATIFICAÇÃO TRIDIMENSIONAL**

Wesley Pacheco Calixto

[UFU/FEELT] & [UC/ISR]
[Uberlândia - Minas Gerais - Brasil] & [Coimbra - Portugal]
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA
INSTITUTO DE SISTEMAS E ROBÓTICA

**MÉTODOS MATEMÁTICO E COMPUTACIONAL
APLICADOS A PROSPECÇÃO GEOELÉTRICA COM
ESTRATIFICAÇÃO TRIDIMENSIONAL**

Wesley Pacheco Calixto

Tese apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e Universidade de Coimbra (UC), sob a orientação do Prof. Dr. Luciano Martins Neto - UFU, e co-orientação dos Prof. Dr. Keiji Yamanaka - UFU & Prof. Dr. António Paulo Mendes Breda Dias Coimbra - UC.

[UFU/FEELT] & [UC/ISR]
[Uberlândia - Minas Gerais - Brasil] & [Coimbra - Portugal]
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistemas da Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

C153m Calixto, Wesley Pacheco, 1971.

Métodos Matemático e Computacional Aplicados a
Prospecção Geoelettrica com Estratificação Tridimensional
[manuscrito]/ Wesley Pacheco Calixto. – [Uberlândia - Mi-
nas Gerais - Brasil] & [Coimbra - Portugal]: [UFU/FEELT]
& [UC/ISR], 2012.

175 f. : il.

Orientador: Luciano Martins Neto - UFU. Co-
orientador: Keiji Yamanaka - UFU & A. Paulo Coimbra -
UC

Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uber-
lândia - UFU, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica & Universidade de Coimbra - UC

Inclui bibliografia.

1.Estratificação horizontal do solo - Teses. 2.Estratifi-
cação tridimensional - Resistividade elétrica do solo -
Teses. 3.Modelos matemáticos & computacional - Teses.
4.Aparato para coleta de dados. I. Martins Neto, Lu-
ciano; Yamanaka, Keiji; Coimbra, António Paulo Mendes
Breda Dias. II. Universidade Federal de Uberlândia &
Universidade de Coimbra. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica & Instituto de Sistemas e Robótica.
III. Título

CDU 621.3.537:681.5

Copyright © 2012 by Federal University of Uberlândia - UFU, Brazil & University of
Coimbra - UC, Portugal. No part of this publication may be reproduced, stored in a
retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical,
photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from
the Library of UFU, with the exception of any material supplied specifically for the

purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

“Great spirits have always encountered opposition from mediocre minds. The mediocre mind is incapable of understanding the man who refuses to bow blindly to conventional prejudices and chooses instead to express his opinions courageously and honestly”.

ALBERT EINSTEIN
em “New York Times”, March 13, 1940.

*A todas as pessoas que me acolheram de alguma forma. Entre
e amigos queridos que abdicaram da minha presença em vários
momentos. A eles dedico este nosso trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Em uma viagem, o caminho percorrido é tão importante quanto o objetivo ”a chegada”. Durante a minha jornada em busca do término deste trabalho, pelos caminhos a serem esquadrinhados, fiz, entre outras coisas, inúmeras amizades que levarei para o resto de minha vida, a todas elas, os meus mais sinceros agradecimentos. Em particular, agradeço:

Ao meu mentor e orientador, Prof. Luciano Martins Neto - UFU/FEELT pela paciência de tolerar a mim e minhas idéias fixas, agradeço-o imensamente sem esquecer o oportunidade e benquisto gesto, o favor, o préstimo de sua sabedoria a mim atirada. Ao meu amigo e orientador para assunto de qualquer natureza, Prof. Paulo Coimbra - UC/ISR, seu caráter é algo de que quero lembrar-me todos os dias. Obrigado por ter enriquecido os meus dias com a felicidade da vossa presença. Aceite os meus mais sinceros agradecimentos pelas ofertas gratuitas de ensinamentos.

Ao meu irmão, amigo e companheiro de luta Prof. Aylton José Alves - IFTGO por me ajudar a fazer de minha vida um palco de felicidades. Por me ajudar a entender que há algo mais, necessitando apenas de ter fé para encontrar a paz, sempre a paz. Ao Prof. Huberto José Kliemann - UFG/AEAE, pela ajuda nas coletas de dados, classificações dos solos e o mais importante, pela sua amizade incondicional. Aos meus grandes amigos Marcel Wu, Matheus Garcia Soares, Will Roger Pereira e Prof. Bernardo (Pinheiro de) Alvarenga - UFG/EEEC que nas horas mais difíceis estavam ali ao meu lado, sempre ao meu lado, vocês são únicos e autênticos. A minha hipermegamiga, Cinara Fagundes Paranhos Mattos, a secretária mais eficiente da Universidade Federal de Uberlândia & ao Prof. Alexandre Cardoso - UFU/FEELT, Coordenador da Pós-Graduação, do qual sem a ajuda deles eu estaria preso em processos burocráticos, que estes conselhos perdurem para eternidade.

Aos Prof. Keiji Yamanaka - UFU/FEELT e Prof. José Paulo Molin - USP/Esalq pelas sugestões e orientações que muito me ajudaram e serviram. Aos meus grandes amigos da república dos Missionários Combonianos - Coimbra/Portugal, obrigado pela aceitação, tolerância e os ensinamentos. Vocês são como jóias raras. A CAPES/MEC pela bolsa de estudo que sem ela, nada teria sido possível.

A todos os amigos & colegas que de alguma forma auxiliaram para o término desta jornada, que até aqui, ao literal da frase, ”...valeu a pena...”.

RESUMO

Este trabalho apresenta duas metodologias de otimização para obtenção dos parâmetros da estratificação do solo representado por uma estrutura de múltiplas camadas horizontalmente sobrepostas. A partir das metodologias de otimização aplicadas a estratificação geoelétrica, é desenvolvido um método de estratificação tridimensional. A metodologia de otimização utiliza uma curva de resistividade aparente experimental obtida a partir de medições feita no próprio solo a ser estratificado. Esta curva experimental é depois comparada com uma curva de resistividade aparente teórica. A curva de resistividade aparente teórica é desenvolvida a partir do algoritmo de Sunde, que utiliza equações de propagação de onda em meios estratificados. Este algoritmo tem como dados de entrada os parâmetros do solo estratificado e de saída a curva de resistividade aparente teórica. Com ambas as curvas, experimental e teórica, calcula-se o erro produzido no processo de estratificação horizontal do solo. Uma das principais características desta modelagem em relação aos métodos já desenvolvidos, é a otimização do número de camadas. Alguns erros e equívocos cometidos na estratificação do solo em várias camadas horizontais são discutidos e um Dispositivo para auxiliar na estratificação tridimensional do solo em larga escala e um operador matemático para auxiliar no processo de otimização são propostos. Os resultados obtidos com esta nova modelagem são então apresentados e discutidos.

MATHEMATICAL AND COMPUTATIONAL METHODS APPLIED TO GEOELECTRICAL PROSPECTION WITH TRIDIMENSIONAL STRATIFICATION

ABSTRACT

This work presents two optimization methods to obtain the parameters of stratification of the soil represented by a multilayer structure superimposed horizontally. From of the optimization methodologies applied the geoelectrical stratification is developed a method of three-dimensional stratification. The optimization methodology uses a resistivity experimental apparent curve obtained from measurements made on the soil to be stratified. The experimental curve is then compared with the resistivity theoretical apparent curve. The resistivity theoretical apparent curve is developed from the algorithm Sunde, using equations of wave propagation in stratified ways. This algorithm takes as input the parameters of the stratified soil and as output data a resistivity theoretical apparent curve. With both experimental and theoretical curves, it is calculated the error produced in the process of horizontal soil stratification. A main feature of this model compared to the methods already developed is the optimization of the number of layers. Some errors and misconceptions committed in the horizontal soil stratification in several layers are discussed and an apparatus to assist in large scale three-dimensional soil stratification and a mathematical operator to assist in the optimization process are proposed. The results obtained with this new model are also presented and discussed.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	31
1.1 Aplicação na Agricultura	32
1.2 Aplicação na Engenharia Elétrica	33
1.3 Objetivos	34
1.4 Desenvolvimento do Trabalho	35
CAPÍTULO 2 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO	37
2.1 Método de Wenner	37
2.2 Estratificação Horizontal do Solo	39
2.2.1 Estratificação Horizontal do Solo em Duas Camadas	40
2.2.2 Estratificação Horizontal do Solo para <i>N</i> -Camadas	41
CAPÍTULO 3 MODELAGEM MATEMÁTICA	45
3.1 Algoritmo de Sunde	45
3.2 Obtenção da Resistividade da Primeira Camada	50
3.3 O Problema Inverso	52
3.4 Modelagem Matemática do Processo Inverso	53
CAPÍTULO 4 PROCEDIMENTOS E METODOLOGIA	55
4.1 Procedimentos para Coleta de Dados em Campo	55
4.2 Processo de Otimização das Curvas	58
4.3 Método das Imagens Complexas	58
4.4 Método de Quase-Newton	59
4.5 Algoritmo Genético (AGCR)	63
4.5.1 Operador Matemático Proposto (OED)	68

4.5.2	Taxas, Critérios de Parada e Pseudo Código do AGCR	73
4.6	Estratificação Tridimensional	75
CAPÍTULO 5 APLICAÇÕES E RESULTADOS		81
5.1	Aplicação do Método de Quase-Newton	81
5.1.1	Estudo de Caso 1	81
5.1.2	Estudo de Caso 2	82
5.1.3	Estudo de Caso 3	83
5.1.4	Estudo de Caso 4	85
5.1.4.1	Comentário 1	86
5.2	Aplicação do Algoritmo Genético	88
5.2.1	Desempenho do AGCR	88
5.2.2	Estudo de Caso 5	92
5.2.3	Estudo de Caso 6	93
5.2.4	Estudo de Caso 7	95
5.2.5	Estudo de Caso 8	97
5.2.5.1	Comentário 2	101
5.3	Aplicações & Comparações de Resultados	102
5.3.1	Estudo de Caso 9	102
5.3.2	Estudo de Caso 10	104
5.3.3	Estudo de Caso 11	105
5.3.4	Estudo de Caso 12	107
5.3.5	Estudo de Caso 13	110
5.3.6	Estudo de Caso 14	113
5.3.7	Estudo de Caso 15	116
5.3.8	Estudo de Caso 16	117
5.3.8.1	Comentário 3	120
5.4	Aplicação da Estratificação <i>3D</i>	123
5.4.1	Estudo de Caso 17	124
5.4.2	Estudo de Caso 18	125
5.4.3	Estudo de Caso 19	126
5.4.4	Estudo de Caso 20	127
5.4.4.1	Comentário 4	128
5.5	Estratificação <i>3D</i> com Solo Classificado	132
5.5.1	Estudo de Caso 21	133
5.5.2	Estudo de Caso 22	135

5.5.3	Estudo de Caso 23	137
5.5.3.1	Comentário 5	140
CAPÍTULO 6 DISPOSITIVO		145
6.1	Dispositivos Similares	145
6.2	Descrição do Dispositivo Proposto	147
6.2.1	Aplicação do Método em Conjunto com o Dispositivo	150
CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO		155
7.1	Contribuições do Trabalho	157
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	159
ANEXO A ROTINA DO ALGORITMO DE SUNDE		161
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		165
GLOSSÁRIO		173
ÍNDICE		175

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Método de Wenner.	37
2.2 Curvas de resistividades aparentes crescente e decrescente.	41
3.1 Solo estratificado em várias camadas horizontais.	45
3.2 Algoritmo de Sunde.	46
4.1 Direções para aplicação do método de Wenner.	56
4.2 Produção da curva $\rho_{aE}(a)$	57
4.3 Processo de otimização das curvas.	59
4.4 Algoritmo genético clássico.	64
4.5 Construção de um indivíduo da população.	65
4.6 $E_j(q')$, gene extrapolado na posição j correspondente ao intervalo de gerações considerado.	70
4.7 Ilustração do OED.	71
4.8 Extrapolação spline cúbica obtida para os genes da Fig. 4.7.	72
4.9 Extrapolação por pedaços cúbicos de polinômios obtida para os genes da Fig. 4.7.	73
4.10 Discretização da área escolhida para a estratificação.	76
4.11 Formação das subáreas $S_{i,j}$	76
4.12 Interpolação das superfícies de separação.	77
4.13 Representação das profundidades e seus desvios padrão.	78
4.14 Representação gráfica das profundidades.	79
4.15 Representação das superfícies de separação entre as camadas.	80
5.1 Caso 1 - Curvas de resistividades aparentes.	82
5.2 Caso 2 - Curvas de resistividades aparentes.	83
5.3 Caso 3 - Curvas de resistividades aparentes.	84
5.4 Caso 4 - Curvas de resistividades aparentes.	86
5.5 $\Delta(g, y)$ da mutação, espessura (vermelho) e resistividade (azul).	89
5.6 $\Delta(g, y) \approx 8,2$ vezes menor com relação ao da Fig. 5.5.	89
5.7 Desempenho do AGCR com $\Delta(g, y)$ da Fig. 5.5.	90
5.8 Desempenho do AGCR com $\Delta(g, y)$ da Fig. 5.6.	90
5.9 Diversidade da população da Fig. 5.7.	91
5.10 Diversidade da população da Fig. 5.8.	92
5.11 Caso 5 - Curvas de resistividades aparentes.	94

5.12 Caso 6 - Curvas de resistividades aparentes.	95
5.13 Caso 7 - Curvas de resistividades aparentes.	97
5.14 Caso 8 - Curvas de resistividades aparentes.	98
5.15 Caso 8 - Curvas de resistividades com N otimizado.	100
5.16 Caso 9 - Curvas de condutividades aparentes.	103
5.17 Caso 10 - Curvas de condutividades aparentes.	105
5.18 Caso 11 - Curvas de resistividades aparentes.	106
5.19 Caso 12 - Curvas de resistividades aparentes.	109
5.20 Caso 13 - Curvas de resistividades aparentes.	112
5.21 Caso 14 - Curvas de resistividades aparentes.	115
5.22 Caso 15 - Curvas de resistividades aparentes.	117
5.23 Caso 16 - Curvas de resistividades aparentes.	119
5.24 Comparação entre soluções geradas (indivíduos).	122
5.25 Caso 17 - Superfícies interpoladas 3D.	124
5.26 Caso 18 - Superfícies interpoladas 3D.	125
5.27 Caso 19 - Superfícies interpoladas 3D.	126
5.28 Caso 20 - Superfícies interpoladas 3D.	127
5.29 Caso 18 - h_2 assume o lugar de h_1 , Fig. 5.26.	128
5.30 Caso 19 - h_2 assume o lugar de h_1 , Fig. 5.27.	129
5.31 Caso 18 - Superfícies não interpoladas, Fig. 5.26.	129
5.32 Visualização em camadas paralelamente sobrepostas.	130
5.33 Distribuição das profundidades das camadas para o Caso 17, Fig. 5.25.	132
5.34 Caso 21 - Perfil de Neossolo Litólico Distrófico léptico, epiálico, caulinítico, fase Cerrado tropical subcaducifólio, relevo forte ondulado pelo SiBCS (EMBRAPA, 2006) e Lithic Orthents pelo Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1999).	133
5.35 Caso 21 - Visualização da estratificação com interpolação referente ao perfil da Fig. 5.34.	134
5.36 Caso 22 - Perfil do Plintossolo Argilúvico Concretionário léptico pelo SiBCS (EMBRAPA, 2006) e Typic Plinthaquox pelo Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1999).	136
5.37 Caso 22 - Visualização da estratificação com interpolação referente ao perfil da Fig. 5.36.	136
5.38 Caso 23 - Perfil do Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico pelo SiBCS (EMBRAPA, 2006) (EMBRAPA, 2006) e Typic Haplustult pelo Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1999).	138

5.39 Caso 23 - Visualização da estratificação com interpolação referente ao perfil da Fig. 5.38.	139
5.40 Caso 21 - Visualização da estratificação sem interpolação referente ao perfil da Fig. 5.34.	140
5.41 Caso 21 - Visualização das condutividades por subárea referente ao perfil da Fig. 5.34. a) primeira camada. b) segunda camada.	141
5.42 Caso 21 - Curvas de isovalores referente ao perfil da Fig. 5.34. a) primeira camada. b) segunda camada.	141
5.43 Caso 23 - Distribuição das camadas em profundidade referente ao perfil da Fig. 5.38.	142
6.1 Método de Wenner, utilizado para a estratificação com várias camadas. .	146
6.2 Duas situações em que o simples mapeamento da condutividade aparente a duas profundidades, h_a e h_b , pode dar o mesmo resultado, apesar de serem distintas.	146
6.3 Parte do dispositivo que faz o contato com o solo (eletrodos).	148
6.4 Vista frontal de parte do dispositivo.	149
6.5 Estrutura que conecta o dispositivo à máquina de arrasto.	149
6.6 Dispositivo conectado a máquina de arrasto.	150
6.7 Montagem do dispositivo.	150
6.8 Vista frontal do dispositivo completo.	151
6.9 Configuração para captura dos dados.	152
6.10 Fluxo de entrada e saída de dados.	153

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Manipulação dos dados medidos para a produção da curva $\rho_{aE}(a)$	57
4.2 Valores encontrados para os genes usando dois métodos de extração.	73
5.1 Caso 1 - Resistividades aparentes.	81
5.2 Caso 1 - Resultado da estratificação do solo.	82
5.3 Caso 2 - Resistividades aparentes.	83
5.4 Caso 2 - Resultado da estratificação do solo.	83
5.5 Caso 3 - Resistividades aparentes.	84
5.6 Caso 3 - Resultado da estratificação do solo.	84
5.7 Caso 4 - Resistividades aparentes experimental & teórica MQ-N.	85
5.8 Caso 4 - Resistividades aparentes experimental & teórica MIC.	85
5.9 Caso 4 - Resultado da estratificação do solo.	86
5.10 Caso 5 - Resistividades aparentes experimental & teórica MQ-N.	93
5.11 Caso 5 - Resistividades aparentes experimental & teórica AGCR.	93
5.12 Caso 5 - Resultado da estratificação do solo.	93
5.13 Caso 6 - Resistividades aparentes experimental & teórica MQ-N.	94
5.14 Caso 6 - Resistividades aparentes experimental & teórica AGCR.	95
5.15 Caso 6 - Resultado da estratificação do solo.	96
5.16 Caso 7 - Resistividades aparentes experimental & teórica MQ-N.	96
5.17 Caso 7 - Resistividades aparentes experimental & teórica AGCR.	96
5.18 Caso 7 - Resultado da estratificação do solo.	97
5.19 Caso 8 - Resistividade experimental.	98
5.20 Caso 8 - Resistividades teóricas.	99
5.21 Caso 8 - Valores das diferenças.	99
5.22 Caso 8 - Resultados dos parâmetros da estratificação com $N = 2$	99
5.23 Caso 8 - Resistividades & desvios para N otimizado.	100
5.24 Caso 8 - Resultado com N otimizado.	100
5.25 Caso 9 - Condutividades experimental & teórica com desvios.	103
5.26 Caso 9 - Comparação do valor de σ_1	103
5.27 Caso 9 - Resultado da estratificação do solo.	104
5.28 Caso 10 - Condutividades experimental & teórica com desvios.	104
5.29 Caso 10 - Comparação do valor de σ_1	104
5.30 Caso 10 - Resultado da estratificação do solo.	105
5.31 Caso 11 - Resistividade aparente experimental.	106

5.32 Caso 11 - Valores das resistividades aparentes teóricas.	106
5.33 Caso 11 - Diferenças entre as curvas experimental & teóricas.	107
5.34 Caso 11 - Resultados da estratificação do solo.	107
5.35 Caso 12 - Resistividade aparente experimental.	108
5.36 Caso 12 - Valores das resistividades aparentes teóricas.	109
5.37 Caso 12 - Diferenças entre as curvas experimental & teóricas.	110
5.38 Caso 12 - Resultados da estratificação do solo.	110
5.39 Caso 13 - Valores das resistividades aparentes experimental e teóricas para os métodos AGCR, CBGA & MSD.	111
5.40 Caso 13 - Valores das diferenças para os métodos AGCR, CBGA & MSD.	112
5.41 Caso 13 - Resultados das estratificações do solo.	112
5.42 Caso 14 - Valores da resistividade aparente experimental e as distâncias entre as hastas.	113
5.43 Caso 14 - Valores das resistividades aparentes teóricas para os métodos AGCR, GTNR & LSMT.	114
5.44 Caso 14 - Valores das diferenças para os métodos AGCR, GTNR & LSMT.	114
5.45 Caso 14 - Resultados das estratificações do solo.	115
5.46 Caso 15 - Valores das resistividades aparentes experimental e teóricas para os métodos AGCR & FOGT.	116
5.47 Caso 15 - Valores das diferenças para os métodos AGCR & FOGT.	117
5.48 Caso 15 - Resultados das estratificações do solo.	118
5.49 Caso 16 - Valores das resistividades aparentes experimental e teóricas para os métodos AGCR, CBGA & AGP.	118
5.50 Caso 16 - Valores das diferenças para os métodos AGCR, CBGA & AGP.	119
5.51 Caso 16 - Resultados das estratificações do solo.	120
5.52 Caso 16 - Avaliação entre o AGCR e o AGP(em minuto).	120
5.53 Caso 17 - Valores de $\bar{\rho}_i$, \bar{h}_i , \bar{d}_i e seus DPA.	124
5.54 Caso 18 - Valores de $\bar{\rho}_i$, \bar{h}_i , \bar{d}_i e seus DPA.	125
5.55 Caso 19 - Valores de $\bar{\rho}_i$, \bar{h}_i , \bar{d}_i e seus DPA.	126
5.56 Caso 20 - Valores de $\bar{\rho}_i$, \bar{h}_i , \bar{d}_i e seus DPA.	127
5.57 Valores máximos e mínimos das profundidades na fronteira inferior de cada camada.	131
5.58 Caso 21 - Horizontes pedogenéticos.	134
5.59 Caso 21 - Valores médios e seus DPA.	135
5.60 Caso 22 - horizontes pedogenéticos.	135
5.61 Caso 22 - Valores médios e seus DPA.	137
5.62 Caso 23 - Horizontes pedogenéticos.	138
5.63 Caso 23 - Valores médios e seus DPA.	139

5.64 Caso 23 - Valores das profundidades (média, mínima, máxima e desvio padrão) até onde vão as várias camadas.	142
5.65 Caso 23 - Probabilidade de encontrar a camada N_i à profundidade d . . .	143

LISTA DE SÍMBOLOS

α	– Número inteiro gerado aleatoriamente em um dado intervalo
γ	– Cromossomo (indivíduo da prole)
$\Delta(g, y)$	– Valor que define a perturbação que ocorrerá no gene
θ	– Parâmetro que determina o grau de dependência de g
λ	– Multiplicador de Lagrange
φ	– Parâmetro que define o percentual de progresso do OED
ρ	– Resistividade elétrica do solo
$\rho_a(a)$	– Resistividade elétrica aparente do solo
ρ_i	– Resistividade elétrica das camadas i do solo
ρ_N	– Resistividade elétrica da última camada do solo
$\rho_{aE}(a)$	– Curva de resistividade elétrica aparente experimental
$\rho_{aT}(a)$	– Curva de resistividade elétrica aparente teórica
σ	– Condutividade elétrica do solo
$\sigma_a(a)$	– Condutividade elétrica aparente do solo
σ_i	– Condutividade elétrica das camadas i do solo
σ_N	– Condutividade elétrica da última camada do solo
$\sigma_{aE}(a)$	– Curva de condutividade elétrica aparente experimental
$\sigma_{aT}(a)$	– Curva de condutividade elétrica aparente teórica
τ	– Tamanho do torneio do método de seleção do AGCR
v	– Variável probabilística binária de decisão [0 & 1]
a	– Espaçamento entre os eletrodos
A_i	– Coeficiente do algoritmo de Sunde
B	– Matriz aproximação da matriz Hessiana ou Atualização $BFGS$
C	– Comprimento da área a ser estratificada
$c_{m,n}$	– Gene
d_i	– Profundidade das camadas
D_i	– Direções para aplicação do método de Wenner
D_{iv}	– Diversidade da população do AGCR
E_g	– Erro global médio
$f(\underline{x})$	– Função de avaliação dos processos de otimização
g	– Geração corrente do algoritmo genético
g_{max}	– Número máximo de gerações
\mathbb{H}	– Aproximação da inversa da matriz Hessiana
h_i	– Espessura das camadas
h_N	– Espessura da última camada dada por $h_N = \infty$
I	– Corrente elétrica
J_0	– Função de Bessel de primeira espécie ordem zero
k	– Número de iterações
K	– Coeficiente de reflexão

l	– Distância entre a fonte de corrente e um ponto qualquer
L	– Largura da área a ser estratificada
\mathbb{L}	– Lagrangeana
m	– Quantidade de indivíduos em uma população
M	– Distância entre uma aplicação de corrente e outra e/ou comprimento da aresta de cada subárea
M_I	– Matriz contendo os melhores indivíduos de cada geração
n	– Quantidade de genes de um cromossomo
N	– Número de camadas
N_N	– Função característica
p	– Ponto de medida de potencial elétrico
p_f	– Número de pontos de inflexões em uma curva
P_r	– Taxa de recombinação
P_m	– Taxa de mutação
q	– Ponto de injeção de corrente elétrica
q'	– Limite inferior do espaço de busca
q_1, q_4	– Eletrodos de corrente
q_2, q_3	– Eletrodos de tensão
r	– Número real gerado aleatoriamente no intervalo $(0, 1]$
r'	– Limite superior do espaço de busca
R_m	– Resistência elétrica aparente
s_a	– Desvio padrão amostral
$S_{i,j}$	– Subárea
T_1, T_4	– Terminais de corrente do medidor de resistividade elétrica
T_2, T_3	– Terminais de tensão do medidor de resistividade elétrica
$T(t, d)$	– Quantidade de aplicação do método de Wenner
$t_{i,j}$	– Arestas das subáreas na direção C
$v_{i,j}$	– Arestas das subáreas na direção L
V	– Tensão elétrica
V_p	– Potencial elétrico devido a uma fonte pontual
V_{q2}, V_{q3}	– Potenciais elétricos nos pontos q_2 e q_3 , respectivamente
\underline{x}	– Vetor de parâmetros a serem otimizados
y_e	– Valor máximo para a perturbação no gene das espessuras
y_r	– Valor máximo para a perturbação no gene das resistividades
z	– Número de elementos de a

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	– Algoritmo Genético
AGCR	– Algoritmo Genético com Codificação Real que utiliza o ODE
AGP	– Algoritmo Genético com Codificação Real sem o ODE
CBGA	– Classical Binary Genetic Algorithm
FOGT	– First Order Gradient Technique
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers
DPA	– Desvio Padrão Amostral
<i>glos.</i>	– Palavra incluída no glossário
GPS	– Global Positioning System (Geo-Posicionamento por Satélite)
GTNR	– Gradient Technique with Method Newton-Raphson
LSMT	– Least-Squared Minimization Techniques
MEF	– Método dos Elementos Finitos
MQ-N	– Método de otimização de Quase-Newton
MIC	– Método das Imagens Complexas
MSD	– Method of Steepest-Descent
NBR	– Norma Brasileira de Regulamentação
OED	– Operador de Evolução Orientado
PVC	– Policloreto de Vinilo

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Em muitas aplicações, particularmente na engenharia elétrica e na agricultura, é muito importante conhecer o comportamento do solo quanto à sua propriedade condutora de eletricidade (LUND et al., 1998). Nos metais esta propriedade se traduz pelo valor da sua resistividade elétrica, que tem sua variação intimamente ligada a temperatura, impurezas etc. (CALIXTO et al., 2010b), porém, relativamente pequenas e com uma grande homogeneidade ao longo das dimensões dos condutores elétricos. No caso do solo, estas variações e a heterogeneidade são extremamente grandes e provocam dificuldades na obtenção de modelos que correspondam com as reais características do solo.

Alguns minerais presentes no solo aparecem como dielétricos, como é o caso da Mica. Em alguns solos pode existir uma pequena corrente elétrica sendo conduzida através da superfície das partículas e de trincas no subsolo, levando a crer que o valor obtido para a resistividade elétrica de um solo é "principalmente" devido ao seu teor de água e de sais dissolvidos (NADLER; FRENKEL., 1980), onde, uma corrente elétrica I pode ser conduzida através da água intersticial, que contêm eletrólitos dissolvidos e através dos cátions trocáveis, que residem perto da superfície de partículas de solo carregadas. Estas partículas são eletricamente móveis em vários níveis (FREE-LAND, 1989). Portanto, a resistividade elétrica depende "principalmente" da solução eletrolítica existente no solo (MOLIN et al., 2005).

O valor da condutividade elétrica (inverso da resistividade elétrica) obtida em laboratório através de amostras de solo devidamente manipulada formando pastas de saturação ou extratos aquosos, não corresponde ao seu real valor quando esta faz parte do solo original. Ao coletar a amostra uma série de características físicas são alteradas, tais como: umidade, compactação etc (MACHADO et al., 2006) e (CALIXTO et al., 2010a). Desta forma, métodos de medição não invasivos (TABBAGH et al., 2000) são aqueles que apresentam resultados mais próximos da realidade.

Dos conhecidos métodos não invasivos, existem aqueles que se baseiam na injeção de corrente elétrica. Em função da penetração da mesma no solo, é possível conhecer a resistividade elétrica em profundidades cada vez maiores. Nestes métodos, as medições da corrente e da tensão não são suficientes para se conhecer diretamente

a resistividade elétrica do solo, principalmente pelo fato do mesmo se comportar de uma forma heterogênea, na grande maioria dos casos. Desta forma, há necessidade de modelos geofísicos que representam o solo quanto ao seu comportamento elétrico. O modelo mais comum corresponde ao solo representado por camadas horizontais, onde cada uma delas possui a sua determinada resistividade (TAGG, 1964).

1.1 Aplicação na Agricultura

Na agricultura, são várias as pesquisas que vem utilizando a condutividade elétrica como indicador de algumas propriedades físico-químicas (MOLIN et al., 2005). A utilização na agricultura provém do fato de que os diferentes componentes físicos e químicos existentes no solo apresentam diferentes níveis de condutividade elétrica. É sabido que a condutividade elétrica do solo se relaciona com algumas propriedades física e química deste solo. Assim, foi desenvolvido um método de campo para avaliar a textura, umidade e salinidade (RHOADES; INGVALSON, 1971) e (BANTON et al., 1997), onde os valores desta condutividade, são relacionados com algumas propriedades físico-químicas do solo.

A configuração geológica afeta significativamente o tipo e a forma de uma determinada lavoura. Além disso, a composição físico-química do solo varia com o tempo, estando intimamente ligada ao clima (CALIXTO et al., 2010b). A agricultura moderna discute amplamente a necessidade de considerar a variabilidade espacial das lavouras, o que tem sido denominado de agricultura de precisão, que é uma maneira de gerir um espaço produtivo com detalhamento espacial, levando em conta o fato de que o solo em cada pequena região da lavoura apresenta propriedades diferentes (SRINIVASAN, 2006).

Um dos princípios da agricultura de precisão baseia-se na propriedade do solo de variar a condutividade elétrica de acordo com as suas propriedades físico-químicas. Ao mapear a condutividade elétrica de um terreno, identificam-se áreas com características físico-químicas homogêneas. De posse destes valores mapeados geograficamente dentro de um terreno, é possível dividir as regiões em áreas de manejo e, então, proceder à coleta de algumas amostras para serem analisadas e, em função das suas propriedades físico-químicas, tomar decisões de como e quanto intervir com os insumos, defensivos e irrigação. O mapeamento da condutividade tornou-se assim uma ferramenta eficiente na investigação do comportamento e da variabilidade espacial do solo, permitindo identificar áreas com propriedades semelhantes e delimitar

facilmente unidades de gerenciamento diferenciado ([EISENREICH, 2001](#)).

As técnicas correntemente utilizadas na agricultura de precisão para encontrar o valor da condutividade elétrica consideram o solo verticalmente homogêneo (sem considerar a existência de camadas com condutividades diferentes) e medem a condutividade elétrica "aparente", considerada constante até à profundidade em análise. As profundidades normalmente consideradas são em torno de 0.2 m a 0.9 m, dependendo do equipamento utilizado. Esta análise superficial, em determinadas culturas e regiões, deixou de ser considerada suficiente, uma vez que o sistema radicular de algumas plantas atingem profundidades muito superiores e que os valores obtidos para a condutividade elétrica aparente nem sempre coincidem entre os dispositivos utilizados ([GEBBERS et al., 2009](#)). Existe assim a necessidade de conhecer o solo até à profundidade do sistema radicular das plantas, responsável pela absorção de nutrientes do solo. Várias pesquisas vêm demonstrando a existência, nas regiões secas, de um ecossistema rico e ativo em profundidade, com macro e microorganismos ([SILVA et al., 1989](#)), ([CANADELL et al., 1996](#)), ([BÖHM, 1979](#)), ([BASSOI et al., 1994](#)), ([COELHO; OR, 1999](#)), ([FAO, 1998](#)), ([McCULLEY et al., 2004](#)), ([WIERSUM, 1967](#)), ([FOX; LIPPS, 1960](#)). Em vários trabalhos ([SÉGER et al., 2009](#)), ([BESSION et al., 2004](#)), ([SAMOUËLIAN et al., 2005](#)), os autores mostram a relação da condutividade elétrica e das espessuras das camadas do solo, com propriedades como a hidrodinâmica e a compactação do terreno, mostrando a utilidade do conhecimento do valor da condutividade elétrica do solo.

1.2 Aplicação na Engenharia Elétrica

Na Engenharia Elétrica, por ocasião do desenvolvimento de projetos de aterramentos elétricos, são utilizados vários processos para obter a estratificação do solo em camadas horizontais. No entanto, todos os métodos, tanto os gráficos quanto os computacionais, acabam gerando erros, *a priori*, desconhecidos ([IEEE Std 142, 1991](#); [IEEE Std 81, 1983](#)). Isso pode representar alguns problemas, uma vez que eles, em certos casos ultrapassam limites aceitáveis ([CALIXTO et al., 2010a](#)).

Um dos problemas a ser solucionado está em distinguir em uma estratificação, o erro computacional do erro que representa a não adequação do solo em camadas horizontais. Outro problema é a imposição do número de camadas nas estratificações, uma vez que, a rigor, na estratificação o número de camadas é uma incógnita e não um dado do problema. Por fim, a obtenção da resistividade da primeira camada,

tradicionalmente é feita através de extração matemática, em certos casos, ocasionando erros não aceitáveis.

Observa-se que na engenharia elétrica, todos os problemas representativos à estratificação do solo em camadas horizontais estão diretamente relacionados com a precisão alcançada pelos processos de otimização. Desta forma, objetiva-se melhorar a precisão na estratificação do solo através do desenvolvimento de uma modelagem matemática apropriada, que permita a sua implementação numérica por métodos computacionais de otimização. Neste caso, utiliza-se métodos de otimização exata, Quase-Newton (MQ-N), e de otimização heurística, algoritmo genético (AG), na minimização dos valores dos erros inerentes encontrados no processo de estratificação. Faz parte da modelagem a obtenção do número de camadas e o desenvolvimento de um método específico para obter a resistividade da primeira camada do solo, levando em consideração os conceitos físicos e não a extração matemática.

Na estratificação do solo, existem dois métodos muito difundidos. O método francês ou método de *Schlumberger* ([ORELLANA, 1974](#)), que é próprio para mensurar resistividades de camadas profundas e é aplicado geralmente em terrenos de grandes dimensões. O método de *Wenner* ([WENNER, 1916](#)), que apesar de necessitar de mais leituras em campo com relação ao método de *Schlumberger*, pode ser aplicado em terrenos de pequenas dimensões, se tornando mais preciso. Neste trabalho utiliza-se o método de *Wenner*.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é através de algumas técnicas de otimização, aumentar a precisão no processo de estratificação do solo em camadas horizontais. Foram utilizadas técnicas de otimização exata (Quase-Newton) e heurística (algoritmo genético) na linguagem C++.

Como aplicação prática, desenvolve-se um processo de estratificação 3D para os casos de grandes áreas onde pode-se apresentar uma heterogeneidade horizontal do solo. Na agricultura é evidente esta hipótese, e na engenharia elétrica, esta hipótese é válida em projetos, por exemplo, de subestações de energia elétrica.

1.4 Desenvolvimento do Trabalho

Para o desenvolvimento deste trabalho são descritos, no Capítulo 2 o método de Wenner e a modelagem para estratificação em duas e em N -camadas. No Capítulo 3 é apresentada toda a modelagem matemática e os problemas direto e inverso da estratificação do solo em N -camadas.

São dispostos no Capítulo 4 os procedimentos básicos para a produção da curva de resistividade aparente experimental e a apresentação do método das Imagens Complexas, que é um método difundido e utilizado em softwares de estratificação em N -camadas e que será utilizado para comparar os resultados com as metodologias propostas. Ainda neste Capítulo, descreve-se os métodos de otimização exata e heurística, a proposta de um Operador de Evolução Dirigida utilizado no algoritmo genético, e a estratificação tridimensional.

No Capítulo 5 são analisados vários casos com aplicações na engenharia elétrica e na agricultura. No Capítulo 6 um dispositivo é proposto para a aplicação da estratificação tridimensional na agricultura.

CAPÍTULO 2

ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Neste Capítulo, são apresentados assuntos que permitem dar a necessária compreensão física e matemática à modelagem desenvolvida em todo o trabalho. Discorre-se sobre algumas metodologias de estratificação horizontal do solo em duas e mais camadas.

2.1 Método de Wenner

Uma das metodologias mais utilizadas para calcular o valor da resistividade elétrica do solo por meio de prospecção geoelétrica, foi desenvolvida por Frank Wenner ([WENNER, 1916](#)) e ([GRIFFITHS; KING, 1981](#)). Para a aplicação do método, definida uma direção na superfície do solo, utilizam-se quatro eletrodos alinhados e espaçados como apresentado na Fig. 2.1.

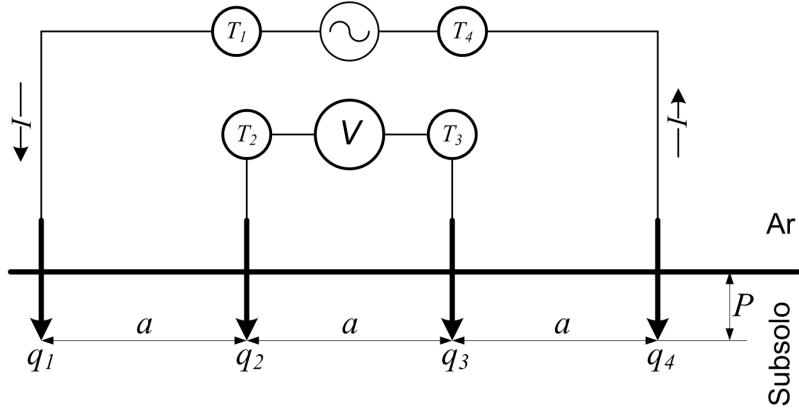


Figura 2.1 - Método de Wenner.

Uma corrente elétrica I é injetada no eletrodo q_1 e coletada no eletrodo q_4 , como ilustrado na Fig. 2.1. Esta corrente, passando pelos eletrodos q_1 e q_4 , produz potenciais nos eletrodos q_2 e q_3 . Considerando o solo homogêneo, os referidos potenciais são obtidos utilizando ([2.1](#)) e ([2.2](#)), de acordo com ([WENNER, 1916](#)) e ([CALIXTO et al., 2010b](#)).

$$V_{q2} = \frac{\rho \cdot I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2P)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2P)^2}} \right] \quad (2.1)$$

$$V_{q3} = \frac{\rho \cdot I}{4\pi} \left[\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2P)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2P)^2}} \right] \quad (2.2)$$

Em (2.1) e (2.2), a é a distância entre os eletrodos, P é a profundidade do eletrodo, ρ a resistividade do solo. A diferença de potencial entre os pontos q_2 e q_3 é dada pela expressão (2.3).

$$V = V_{q2} - V_{q3} = \frac{\rho \cdot I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2P)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2P)^2}} \right] \quad (2.3)$$

Dividindo-se a diferença de potencial (2.3) pela corrente I , obtém-se uma grandeza R_m dimensionalmente igual a uma resistência elétrica (IEEE Std 142, 1991).

$$R_m = \frac{\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + 4P^2}} - \frac{1}{\sqrt{4a^2 + 4P^2}} \right] \quad (2.4)$$

Logo, isolando ρ em (2.4), tem-se a expressão para o cálculo da resistividade elétrica do solo.

$$\rho = \frac{4\pi a R_m}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4P^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4P^2}}} \quad (2.5)$$

Para cada distância a têm-se os valores de V e I , medidos em campo e consequentemente obtém-se R_m e, portanto pode-se calcular ρ em (2.5). Como o solo foi inicialmente considerado homogêneo, variando-se a , o valor de R_m deve também variar de tal forma que ρ permanece inalterado em (2.5). Porém, na prática, o solo dificilmente se comporta com homogeneidade, e assim, o valor de ρ calculado em (2.5) deve variar com a distância a . A grandeza ρ deixa de ter o significado de resistividade elétrica do solo, porém, contém nos seus valores em função de a , propriedades que permitem identificar as diversas camadas homogêneas do solo. Assim a grandeza ρ passa a ser identificada por $\rho_a(a)$ e denominada de resistividade elétrica aparente (2.6).

$$\rho_a(a) = \frac{4\pi a R_m}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4P^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4P^2}}} \quad (2.6)$$

O inverso de (2.6) resulta na condutividade elétrica aparente do solo $\sigma_a(a)$.

$$\sigma_a(a) = \frac{1}{\rho_a(a)} \quad (2.7)$$

A partir de (2.6) e das distâncias entre os eletrodos, é possível produzir a curva de resistividade aparente do solo $\rho_a(a)$ em função das distâncias a .

Uma observação importante deve ser feita, um equívoco é cometido quando se considera $R_m [\Omega]$ em (2.4) como sendo a resistência elétrica do solo (compreendida entre os dois eletrodos de injeção de corrente). No método de Wenner, ao dividir a diferença de potencial medido V pela corrente injetada I , em (2.3), para obter R_m na equação (2.4), a magnitude R_m medida no equipamento é dimensionalmente igual a uma resistência elétrica, mas não é a resistência elétrica fornecida pela lei de *Ohm*, podendo ser definida como resistência aparente medida pelo aparelho, $R_m [\Omega]$.

Observe na Fig. 2.1 que através do método de Wenner, não há como medir a tensão no ponto de medição de corrente e não há como medir a corrente no ponto de medição de tensão, ou seja, o ponto de medição da corrente é diferente do ponto de medição da tensão. O modelo resistivo do solo leva à definição da resistividade aparente de acordo com (2.6), o que conceitualmente não deve ser confundido com a definição de Georg *Ohm* da resistência.

2.2 Estratificação Horizontal do Solo

Com base na curva $\rho_a(a)$, várias modelagens matemáticas foram desenvolvidas para estratificar o solo em camadas horizontais, cada uma com a sua peculiaridade.

Admitindo-se um solo de duas camadas, existem alguns métodos que permitem fazer a estratificação obtendo-se ρ_1 e ρ_2 que são as resistividades da primeira e segunda camada respectivamente, e h_1 que é a espessura da primeira camada, baseando-se na expressão $\rho_a(a)$ dada por (2.6). Para solos de maior número de camadas, existem métodos que se baseiam na expressão $\rho_a(a)$ deduzida para duas camadas se estendendo para várias camadas.

2.2.1 Estratificação Horizontal do Solo em Duas Camadas

De Wenner (WENNER, 1916) obtém-se (2.8) que representa a resistividade aparente para solos de duas camadas.

$$\rho_a(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \cdot \frac{h_1}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \cdot \frac{h_1}{a})^2}} \right] \quad (2.8)$$

Onde n é a variável da somatória e K é dado por (2.9).

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.9)$$

Com base em (2.8) pode-se obter uma família de curvas parametrizadas em K e h_1 , desta forma surge o método gráfico de estratificação do solo, admitindo-se duas camadas.

Outra alternativa é a utilização do conceito matemático de otimização, onde tem-se duas curvas, uma curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$ e outra curva de resistividade aparente teórica $\rho_{aT}(a)$. Com as medições de campo, obtém-se os valores experimentais de ρ_a em função de a , designada por curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$. A diferença entre $\rho_{aE}(a)$ e $\rho_{aT}(a)$ é o desvio entre os resultados experimentais e teóricos. Assim, de (2.8) pode-se escrever (2.10), onde por um método de otimização pode-se obter valores de ρ_1 , K e h_1 para os mínimos valores de $f(\underline{x})$. Este é o método de estratificação em duas camadas conhecido como *otimizado*.

$$f(\underline{x}) = \sum \rho(a_i) - \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \cdot \frac{h_1}{a_i})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \cdot \frac{h_1}{a_i})^2}} \right] \quad (2.10)$$

Outro método, conhecido por *simplificado* se baseia nos valores extremos da curva $\rho_a(a)$. De (2.8) pode-se verificar que a função $\rho_a(a)$ somente pode ser crescente ou decrescente, Fig. 2.2.

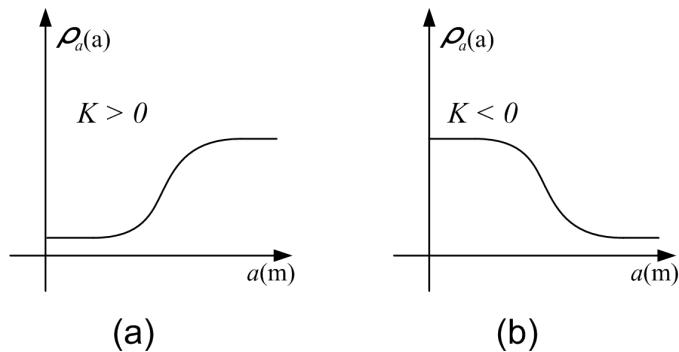


Figura 2.2 - Curvas de resistividades aparentes crescente e decrescente.

Se a função $\rho_a(a)$ for obtida de forma saturada, o valor de $\rho_a(a)$ na plena saturação equivale a ρ_2 , enquanto que sempre para $a = 0$ $\rho_1 = \rho_a(0)$. Conhecidos ρ_1 e ρ_2 , tem-se K através de (2.9). Considerando $a = h_1$ em (2.8), calcula-se a respectiva somatória, que juntando com o valor de ρ_1 , obtém-se a resistividade aparente para a distância a igual a profundidade da primeira camada h_1 . Com o valor desta resistividade aparente, pode-se obter h_1 na função $\rho_a(a)$. Portanto estratifica-se o solo em duas camadas.

2.2.2 Estratificação Horizontal do Solo para N -Camadas

Tradicionalmente os métodos de estratificação para um número de camadas superior a duas, foram desenvolvidos com base na expressão (2.8) da resistividade aparente para duas camadas (IEEE Std 142, 1991).

Dos diversos métodos conhecidos, pode-se citar o método de *Pirson* (PIRSON, 1963), desenvolvido a partir da hipótese que a cada ponto de inflexão p_f da curva formada pela função $\rho_a(a)$ surge uma nova camada de solo. Esta hipótese pressupõe a decomposição desta curva em trechos crescentes e decrescentes, e que cada trecho corresponde a duas camadas. Assim um ponto de inflexão da referida curva acrescenta mais uma camada.

Outro método muito utilizado, conhecido como método de *Yokogawa* (NBR 7117, 1981), também se baseia na associação de trechos crescentes e decrescentes, considerando cada trecho correspondente a duas camadas. Através da expressão (2.8) são confeccionadas curvas parametrizadas cujo conjunto é denominado Curva Padrão. Na passagem de um trecho para o próximo são confeccionadas novas curvas

parametrizadas que associam os dois trechos. O conjunto delas é denominado Curva Auxiliar. Através de um processo gráfico, utilizando ambas as curvas, padrão e auxiliar, é possível estratificar o solo nas diversas camadas que a função $\rho_a(a)$ apresenta. Existem softwares que utilizam este processo gráfico para estratificar o solo. Como este processo se resume em ajustes de curvas, pode-se obter uma precisão melhor computacionalmente em relação ao manual.

Como estes dois métodos, existem outros que, como já mencionado, se baseiam na função $\rho_a(a)$ para duas camadas. O problema desses métodos, e também daqueles referentes à estratificação em duas camadas, está relacionado com o fato de se admitir os trechos crescentes e decrescentes da curva formada pela função $\rho_a(a)$ como correspondente a duas camadas. Realmente, um solo de duas camadas é representado pela curva apenas crescente ou decrescente, mas o inverso não é sempre verdadeiro, ou seja, uma curva crescente ou decrescente não representa *"sempre"* um solo de duas camadas. Isto é fácil de entender, pois ao admitir, por exemplo, um solo formado por três ou mais camadas, onde suas resistividades crescem partindo do sentido da primeira para a última, o valor da resistividade aparente ρ_a deve sempre crescer com o aumento da distância a , isto é, a função $\rho_a(a)$ é sempre crescente. O inverso também é verdadeiro, ou seja, as resistividades das camadas decrescendo, desde a primeira até a última, resultam em $\rho_a(a)$ sempre decrescente.

Do problema aqui exposto e relacionado com o fato de se utilizar a expressão $\rho_a(a)$ para duas camadas ao estratificar um solo, pode-se concluir que comete-se um erro, onde *a priori* não se consegue avaliá-lo, pois a curva $\rho_a(a)$ a ser trabalhada é a experimental e não existe segurança alguma em afirmar que seus trechos crescentes e decrescentes se relacionam com apenas duas camadas. Este erro foi mencionado na Introdução, como sendo o erro *a priori* desconhecido. Desta forma, pode-se chegar a uma conclusão final a respeito das incidências de erros nos métodos de estratificação, e analisar possíveis soluções que minimizem tais erros.

Dois são os pontos de incidência de erros na estratificação do solo em camadas horizontais. O primeiro é o *"erro a priori desconhecido"* analisado anteriormente. O segundo vem do fato do modelo de solo a ser adotado corresponder à formação de camadas horizontais, cada uma homogênea em termos de resistividade. Em relação ao primeiro erro, é importante observar que ao desenvolver quaisquer modelos matemático e computacional que estratifiquem o solo, os dados do problema são apenas os valores ρ_a e as distâncias a , e que o resultado a ser obtido na solução

do problema é um conjunto formado pelo número de camada N , resistividade ρ_i e espessura h_i de cada camada i , sendo infinita a espessura da última camada $i = N$, ou seja:

$$\rho_a(a) \rightarrow N, \rho_i, h_i. \quad (2.11)$$

Nestas condições, para evitar a incidência do erro *a priori* desconhecido, os modelos matemático e computacional a serem utilizados no método de estratificação, não poderão admitir que trechos crescentes e decrescentes correspondam a duas camadas, isto é, matematicamente não se pode tomar como base a expressão (2.8).

Em função desta imposição, uma das soluções é estudar uma expressão equivalente à (2.8), porém válida para qualquer número de camadas. A base deste trabalho é o desenvolvimento de uma modelagem matemática e modelos computacionais que satisfaçam esta condição.

Em relação ao segundo erro, a adequação do solo medido com modelo expresso em camadas horizontais, cada uma delas homogênea, pode-se fazer a seguinte análise: ao se estabelecer uma modelagem matemática resolvida numericamente por um método computacional adequado, de tal forma a eliminar o primeiro erro, os erros que ainda incidirem no resultado final de certa estratificação, são provenientes de duas origens: i) numérica computacional; ii) o modelo matemático para representação do solo em camadas horizontais não representa o solo medido.

Se o erro numérico computacional for reduzido a valores desprezíveis, em relação aos erros normalmente aceitáveis na prática, só restará o erro da adequação do solo ao modelo de camadas horizontais. Ao processar um caso real, se os erros obtidos forem aceitáveis, conclui-se que a estratificação obtida corresponde, com boa aceitação, ao solo medido. Caso contrário, conclui-se que o modelo de camadas horizontais não se adequa ao solo medido.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste Capítulo é apresentada a modelagem matemática que tem como objetivo obter uma expressão da resistividade aparente ρ_a em função do solo já estratificado, ou seja, uma curva de resistividade aparente teórica em função de a , do número de camadas N , suas resistividades ρ_i e espessuras h_i , isto é $\rho_{aT}(a, N, \rho_i, h_i)$. Também faz parte deste Capítulo uma metodologia para mensurar o valor de ρ_1 sem utilizar de extração da curva $\rho_{aE}(a)$, e por fim, demonstra-se a configuração adotada para o problema direto e inverso da estratificação horizontal do solo.

3.1 Algoritmo de Sunde

Considere um potencial elétrico V_p , em um ponto p devido a uma fonte pontual de corrente injetada em um ponto q , onde ambos os pontos, p e q , separados por uma distância l , estão na superfície de um solo formado por N camadas horizontais, como ilustrado na Fig. 3.1 (ORELLANA, 1974).

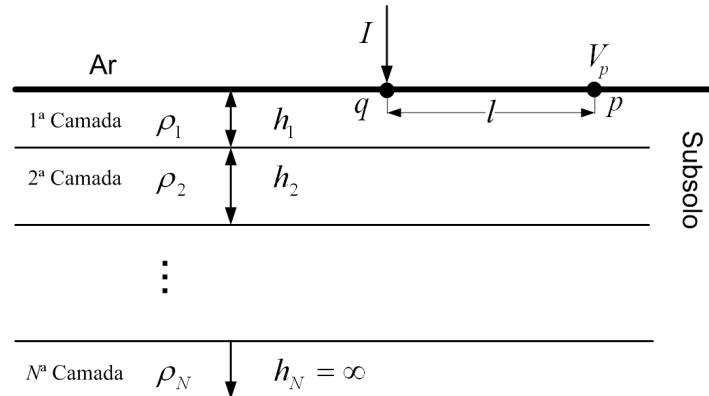


Figura 3.1 - Solo estratificado em várias camadas horizontais.

Um problema de prospecção geoelétrica em meios estratificados parte da determinação do potencial V_p produzido na superfície limite entre a terra e o ar. Para resolver este problema necessita-se encontrar uma solução para a expressão (3.1).

$$V_p = \frac{\rho_1 \cdot I}{2\pi} \cdot \int_0^{\infty} N_N(m) \cdot J_0(mr) dm \quad (3.1)$$

A expressão (3.1) representa uma forma condensada das condições de contorno da distribuição vertical das resistividades. A função característica $N_N(m)$, que define a estrutura do solo heterogêneo, pode ser obtida através do algoritmo de Sunde, Anexo A, cujo procedimento de cálculo é apresentado na Fig. 3.2, (ORELLANA, 1974) e (SUNDE, 1968). Em (3.1) m é a variável auxiliar de integração e J_0 é a função de Bessel de primeira espécie ordem zero. A função característica $N_N(m)$ é necessária para o cálculo da curva de resistividade aparente correspondente ao meio já estratificado. Alguns dados como o número de camadas, espessuras e resistividades que definem o meio determinam univocamente a função característica.

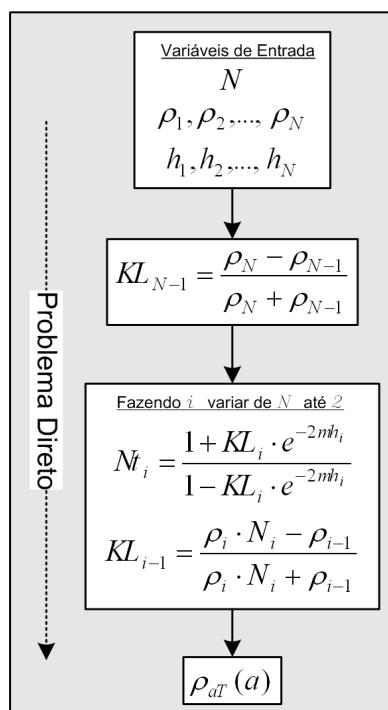


Figura 3.2 - Algoritmo de Sunde.

O valor da função característica $N_N(m)$ é exatamente o resultado obtido por Nt_1 , no algoritmo de Sunde, seguindo o sentido direto indicado na Fig. 3.2 (ver Anexo A).

Aplicando-se o método de Wenner na superfície do solo e calculando a diferença de potencial entre os pontos internos, como indicado no item 2.1 tem-se a resistividade aparente ρ_a em função de a , (3.2).

$$\rho_a = \frac{V_p}{I} = 2\rho_1 \cdot a \cdot \int_0^{\infty} N_N(m) \cdot [J_0(ma) - J_0(2ma)] dm \quad (3.2)$$

A expressão (3.2) e (2.8) representam a mesma grandeza, com a diferença que enquanto (2.8) é específica para o solo de duas camadas, (3.2) é válida para qualquer número de camadas e é conhecida como equações de propagação de ondas em meios estratificados, que representa a estrutura do solo heterogêneo. Para resolver a integral em (3.2), adota-se a seguinte metodologia. A exponencial e^{-2mh_i} no algoritmo de Sunde pode ser escrita como:

$$e^{-2mh_i} = e^{-2mh_1 \cdot r_i} \quad (3.3)$$

$$r_i = \frac{h_i}{h_1} \quad (3.4)$$

fazendo:

$$E = e^{-2mh_1}. \quad (3.5)$$

Substituindo (3.3) em (3.5), tem-se:

$$e^{-2mh_i} = E^{r_i}. \quad (3.6)$$

Agora, substituindo a expressão (3.6) no algoritmo de Sunde, como são conhecidos os valores de r_i , pode-se também obter E^{r_i} , sabendo-se que $0 \leq E \leq 1$. Desta forma, como são conhecidas todas as resistividades e espessuras, pode-se obter pelo algoritmo de Sunde a função característica $N_N(E)$. Decompondo esta função na forma polinomial, tem-se (3.7).

$$N_N(E) = A_0 + A_1 E + A_2 E^2 + \dots \quad (3.7)$$

Pelo algoritmo de Sunde, para $E = 0$, a função $N_N(E) = 1$ e, portanto de (3.7)

tem-se $A_0 = 1$. Assim (3.7) se transforma em (3.8).

$$N_N(E) = 1 + A_1 E + A_2 E^2 + \dots \quad (3.8)$$

Para obter os coeficientes A_i , calcula-se pelo algoritmo de Sunde a função $N_N(E)$ para certa quantidade de valores de E , e através de (3.8), estabelece um sistema de equações cujo número de incógnitas A_i é igual ao número de equações e, portanto, ao resolver o sistema, obtém-se os valores de todos os A_i . Com estes valores, pode-se calcular a função $N_N(E)$ através do polinômio (3.8) e confrontar seus valores com os originais de $N_N(E)$, obtidos pelo algoritmo de Sunde. Desta confrontação pode-se obter a precisão da decomposição polinomial feita.

Caso esta precisão resulte em um valor não aceitável, repete-se todo esse procedimento com uma quantidade maior de valores de E . Por um processo iterativo alcança-se a precisão desejada. Desta forma, obtém-se a função característica $N_N(E)$ decomposta no polinômio da expressão (3.8).

Substituindo (3.8) em (3.2) tem-se (3.9),

$$\rho_a = 2\rho_1 \cdot a \cdot \int_0^\infty [1 + A_1 E + A_2 E^2 + \dots] \cdot [J_0(ma) - J_0(2ma)] dm. \quad (3.9)$$

Um termo genérico de (3.9) pode ser escrito como sendo (3.10),

$$\rho_a = 2\rho_1 \cdot a \cdot \int_0^\infty [A_i \cdot E^i] \cdot [J_0(ma) - J_0(2ma)] dm \quad (3.10)$$

e do cálculo diferencial e integral, tem-se (3.11),

$$\int_0^\infty J_0(mx) \cdot e^{-my} dm = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (3.11)$$

Utilizando (3.5), a integral em (3.10), pode ser resolvida com o auxílio de (3.11), resultando em (3.12),

$$2\rho_1 \cdot a \cdot A_i \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{a^2 + 4h_1^2 \cdot i^2}} - \frac{1}{\sqrt{4a^2 + 4h_1^2 \cdot i^2}} \right]. \quad (3.12)$$

Por analogia com (3.12), obtém-se a solução de (3.9) em (3.13), após algumas manipulações algébricas,

$$\rho(a) = \rho_1 \cdot \left\{ 1 + 2 \sum A_i \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{4 \left(\frac{h_1}{a} \right)^2 i^2 + 1}} + \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{h_1}{a} \right)^2 i^2 + 1}} \right] \right\}, \quad (3.13)$$

organizando (3.13), tem-se:

$$\rho(a) = \rho_1 \cdot \left[1 + 2 \sum A_i \cdot S_i(a) \right], \quad (3.14)$$

onde se definem:

$$S_i(a) = S_1 + S_2 \quad (3.15)$$

$$S_1 = \frac{1}{\sqrt{4\beta^2 i^2 + 1}} \quad (3.16)$$

$$S_2 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\beta^2 i^2 + 1}} \quad (3.17)$$

$$\beta = \frac{h_1}{a} \quad (3.18)$$

Portanto, conhecendo o solo, ou seja, os parâmetros da estratificação N , ρ_i e h_i , pelo algoritmo de Sunde obtém-se a função $N_N(E)$, decompondo-a em um polinômio, obtém-se os coeficientes A_i . Utilizando estes coeficientes, a resistividade da primeira camada e as distâncias a entre os eletrodos, é possível através de (3.14) obter a curva de resistividade aparente teórica $\rho_{aT}(a)$.

Nas técnicas de otimização que serão utilizadas, um dos procedimentos refere-se ao processo iterativo de escolha dos parâmetros N , ρ_i e h_i . Geralmente o critério de escolha é puramente matemático, o que pode produzir como consequência alto tempo de processamento, e às vezes erros inaceitáveis.

Isto pode ser evitado sempre que for possível orientar a obtenção ou mesmo a escolha de alguns parâmetros por outros processos não puramente matemáticos. Neste caso é possível obter a resistividade ρ_1 através de um processo analítico onde as equações utilizadas têm significados físicos.

3.2 Obtenção da Resistividade da Primeira Camada

Considerando dois valores para a distância a , isto é, a_1 e a_2 , de (3.14) tem-se (3.19) e (3.20),

$$\rho(a_1) = \rho_1 \cdot \left[1 + 2 \sum A_i \cdot S_i(a_1) \right] \quad (3.19)$$

$$\rho(a_2) = \rho_1 \cdot \left[1 + 2 \sum A_i \cdot S_i(a_2) \right]. \quad (3.20)$$

Dividindo e subtraindo (3.19) e (3.20), têm-se (3.21) e (3.22), respectivamente,

$$r\rho_a(a_{1,2}) = \frac{\rho(a_1)}{\rho(a_2)} = \frac{\rho_1 \cdot [1 + 2 \sum A_i \cdot S_i(a_1)]}{\rho_1 \cdot [1 + 2 \sum A_i \cdot S_i(a_2)]} \quad (3.21)$$

$$d\rho_a(a_{1,2}) = \rho(a_1) - \rho(a_2) = 2 \sum \rho_1 \cdot A_i \cdot [S_i(a_1) - S_i(a_2)]. \quad (3.22)$$

De (3.21) e (3.22), têm-se respectivamente (3.23) e (3.24),

$$\sum A_i \cdot M_i(a_{1,2}) = r\rho_a(a_{1,2}) - 1 \quad (3.23)$$

$$\sum B_i \cdot G_i(a_{1,2}) = \frac{d\rho_a(a_{1,2})}{2}, \quad (3.24)$$

onde:

$$M_i(a_{1,2}) = S_i(a_1) - r\rho_a(a_{1,2}) \cdot S_i(a_2) \quad (3.25)$$

$$G_i(a_{1,2}) = S_i(a_1) - S_i(a_2) \quad (3.26)$$

$$\rho_1 = \frac{B_i}{A_i}. \quad (3.27)$$

As expressões (3.23) e (3.24), quando a_1 e a_2 se modificam aos pares, representam dois sistemas de equações onde apenas têm-se como incógnitas A_i e B_i . Isto é verdade se a espessura da primeira camada h_1 for conhecida. Neste ponto é preciso fazer uma reflexão importante, uma vez que a princípio h_1 não é conhecido. Pode-se decompor uma camada do solo em diversas camadas de mesma resistividade, de tal forma que a soma de suas espessuras resulte na espessura da camada original. Quando se aplica o algoritmo de Sunde em ambas as condições, a resistividade aparente resulta a mesma.

Desta forma, pode-se imaginar a primeira camada real do solo decomposta em duas camadas virtuais de mesma resistividade ρ_1 . Como não se conhece a espessura da primeira camada real, adota-se um valor para a espessura da primeira camada virtual muito pequeno, de forma que nunca será encontrada uma camada real nesta espessura.

Para satisfazer esta condição a espessura da primeira camada virtual será considerada de 0.05 m (CALIXTO et al., 2010b), no entanto, está camada virtual pode assumir qualquer valor arbitrário. Assim é possível voltar a resolver dois sistemas de equações anteriormente mencionados. Determinando-se A_i e B_i , através de (3.27) obtém-se a resistividade da primeira camada ρ_1 .

De posse do valor de ρ_1 e da espessura virtual da primeira camada do solo é, portanto, possível resolver o algoritmo de Sunde e encontrar a curva de resistividade aparente teórica $\rho_{aT}(a)$. Logo, do exposto até aqui, é possível então desenvolver o processo direto e inverso da estratificação do solo.

3.3 O Problema Inverso

Um problema inverso determina as causas desconhecidas baseando-se na observação dos seus efeitos (NEITTAANMÄKI et al., 1996). Nos problemas diretos, cuja solução pode ser obtida por métodos analíticos ou numéricos, a solução do problema representa os efeitos baseados na descrição completa de suas causas (LIMA, 2001) e (KIRSCH, 1996).

Como verificado na Seção 2.2, uma das possibilidades de se ter um método de estratificação do solo em camadas horizontais com identificação dos erros é utilizar uma expressão teórica da resistividade aparente ρ_a em função das distâncias a , admitindo-se o solo estratificado em um número N de camadas, *a priori* indefinido.

Com vista no que foi exposto no Capítulo 2, com os dados colhidos em campo constrói-se a curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$. De posse de $\rho_{aE}(a)$, produz-se a estratificação e, a partir dos dados do solo estratificado produz-se uma expressão teórica $\rho_{aT}(a)$, utilizando a metodologia descrita na seção 3.1. A expressão teórica $\rho_{aT}(a)$ tem como parâmetros o número de camadas N , as resistividades ρ_i e as espessuras h_i de cada camada. Assim, admitindo-se um solo de N camadas e de resistividades e espessuras ρ_i e h_i , respectivamente, variando os parâmetros N , ρ_i e h_i , pode-se obter a curva de resistividade aparente teórica $\rho_{aT}(a)$.

Observa-se que encontrar a curva de resistividade teórica $\rho_{aT}(a)$, é o problema tido como direto, pois pode ser resolvido diretamente de forma analítica, bastando fazer substituições numéricas de valores dos parâmetros. Porém, o problema de construção da curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$, é o inverso deste, pois, são conhecidos determinados valores de $\rho_a(a)$ através de medições de campo, e por um processo de interpolação obtém-se a curva experimental $\rho_{aE}(a)$. A questão é determinar os parâmetros N , ρ_i , h_i a partir de $\rho_{aE}(a)$, exatamente o inverso do problema tido como direto, podendo ser expresso por (3.28) e (3.29),

$$\text{Problema Direto: } N, \rho_i, h_i \rightarrow \rho_{aT}(a) \quad (3.28)$$

$$\text{Problema Inverso: } \rho_{aE}(a) \rightarrow N, \rho_i, h_i. \quad (3.29)$$

A princípio identifica-se a estratificação do solo como sendo um problema inverso, porém para garantir a identificação dos erros, se faz necessário conhecer a curva de resistividade aparente teórica $\rho_{aT}(a)$, e neste caso o problema se torna o direto. Exatamente neste ponto é que se vislumbra a aplicação das técnicas de otimização, pois, a partir do problema direto obtém-se valores da curva teórica $\rho_{aT}(a)$, que quando comparados com a curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$, possibilita a aplicação de processos de otimização.

3.4 Modelagem Matemática do Processo Inverso

A questão agora passa a ser determinar os parâmetros, N , ρ_i e h_i a partir de $\rho_{aE}(a)$ que produza através do algoritmo de Sunde uma curva teórica $\rho_{aT}(a)$, idêntica a menos de um determinado erro, da curva experimental $\rho_{aE}(a)$. Neste ponto pode-se ver indistintamente o problema inverso, como dispostos nas expressões (3.28) e (3.29).

Partindo da curva de resistividade aparente teórica $\rho_{aT}(a)$ obtida pelo algoritmo de Sunde e de posse da curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$, é possível confrontar os resultados das curvas, através de um processo de otimização e minimizar o erro obtendo a melhor solução para a estratificação do solo.

Para avaliar o desvio entre as curvas no processo de otimização, formula-se uma métrica dada pela expressão (3.30),

$$f(\underline{x}) \leq \sum_{i=1}^z \left| \frac{\rho_{aE_i} - \rho_{aT_i}}{\rho_{aE_i}} \right| \cdot 100. \quad (3.30)$$

Neste ponto, define-se que quando $\rho_{aT}(N, \rho_i, h_i) \approx \rho_{aE}(a)$ a menos de um certo erro na ordem de 10%, o solo pode ser representado em camadas horizontais pois a modelagem corresponde com boa aceitação ao processo de estratificação em camadas horizontalmente sobrepostas. Em (3.30), z é o número de valores que a poderá assumir, ou de outra forma, o número de elementos do vetor a . Estes valores serão detalhadamente explanados na Seção 4.2.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTOS E METODOLOGIA

Neste Capítulo são apresentados os procedimentos de coleta de dados em campo e a forma como é produzida a curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$. Também é apresentado um método bastante conhecido e utilizado para estratificar o solo (Método das Imagens Complexas), este método será utilizado para validar os resultados encontrados pelos métodos propostos. São propostos ainda dois métodos para minimização dos desvios entre as curvas de resistividades aparentes teórica e experimental, um método de otimização exato e o outro heurístico, uma breve introdução sobre os dois métodos é explanada. Ainda neste Capítulo é proposto um operador matemático utilizado na busca de melhores soluções do algoritmo genético e uma modelagem para a estratificação tridimensional.

4.1 Procedimentos para Coleta de Dados em Campo

A curva experimental da resistividade aparente é de fundamental importância, pois, ao estratificar o solo seus valores são tomados como verdadeiros. Portanto, por ocasião da sua obtenção experimental, deve-se cercar de todos os cuidados possíveis para evitar ao máximo a incidência de erros tidos como *"erros práticos"*.

Portanto, para a produção da curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$ é necessário seguir alguns procedimentos básicos. Após ter identificado o local a ser estratificado, deve-se escolher as direções D_i onde será aplicado o método de Wenner, Seção 2.1. Estas direções D_i dependerão da geometria do terreno, como ilustrado na Fig. 4.1. Este procedimento na engenharia elétrica é estático, ao contrário da agricultura onde este procedimento é dinâmico, ou seja, os dados são coletados com um aparelho em movimento.

Estas direções não são fixas, podendo assim ser modificadas de terreno para terreno. O que realmente importa é fazer várias medições sobre todo o terreno, pois, quanto maior o número de direções mais valores poderão ser analisados. A (NBR 7117, 1981) normaliza um número mínimo de cinco direções diferentes para uma área de $10.000\ m^2$.

Um conjunto de ρ_a deve ser feito para z valores de a . Estas z leituras são realizadas sob as direções D_i , neste momento, já definidas. Normalmente utilizam-se valores

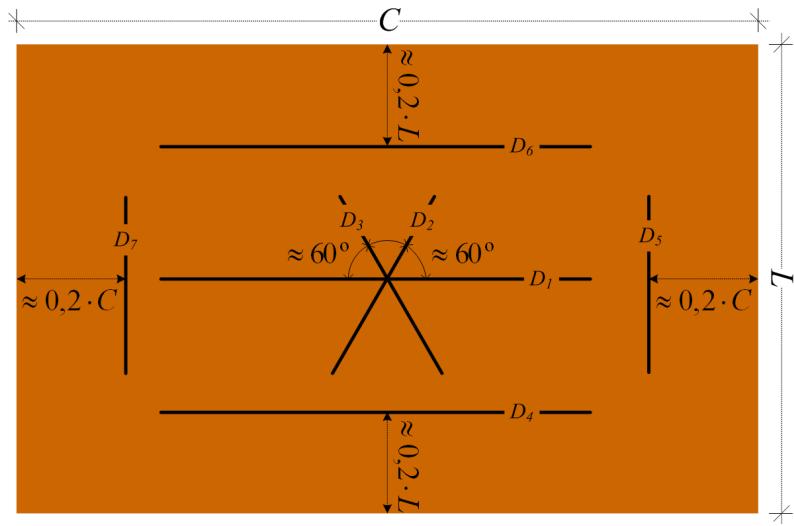


Figura 4.1 - Direções para aplicação do método de Wenner.

pré definidos para a , são eles: 1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 16 m, 32 m e se necessário 64 m e 128 m (NBR 7117, 1981). Este valores de a também podem ser modificados. As z leituras mostrarão como varia a resistividade do solo em função do espaçamento a , sobre todo o terreno.

Com respeito aos valores das resistividades $\rho_a(a)$ medidos, alguns procedimentos solicitam que medidas de $\rho_a(a)$ fora da média mais o desvio padrão devem ser descartados, considerando apenas os valores próximos entre si. Na realidade o que ocorre é um equívoco, quando se realiza a medida de $\rho_a(a)$ em uma determinada direção e este valor fica fora da média, o que se deve fazer é na verdade, refazer as medições na mesma direção e com os mesmos valores de a no mesmo momento que estão sendo feita as medições. Caso o valor de $\rho_a(a)$ permaneça o mesmo ou próximo do mesmo, anteriormente medido, isto significa que sobre aquela direção há algo no subsolo e obviamente, a medida mesmo fora da média deve permanecer.

Um gráfico de $\rho_a(a)$ não definitivo deve ser produzido no local, no momento das medições. Se a curva $\rho_{aE}(a)$ tiver um comportamento muito abrupto, valores de a intermediários devem ser incluídos. Após o término da coleta de dados, os valores de ρ_a e a devem ser manipulados e uma curva $\rho_{aE}(a)$ deve ser produzida, como apresentado na Tab 4.1 e ilustrado na Fig. 4.2, neste caso específico, $z = 6$.

A não variação nos valores das resistividades, quando se varia o valor de a , pode

Tabela 4.1 - Manipulação dos dados medidos para a produção da curva $\rho_{aE}(a)$.

$\rho_a(a)$	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	Média
$\rho_a(1)$	11487	12615	11538	11929	11561	11642	13084	11979
$\rho_a(2)$	10032	9901	9922	9982	9881	10027	9873	9945
$\rho_a(4)$	7781	8009	7979	8179	8194	7878	8301	8046
$\rho_a(8)$	14820	14424	14460	14297	14246	14209	14011	14352
$\rho_a(16)$	14931	15693	16397	15451	15825	15273	16459	15718
$\rho_a(32)$	10334	9138	9046	9599	10148	8991	20187	11063

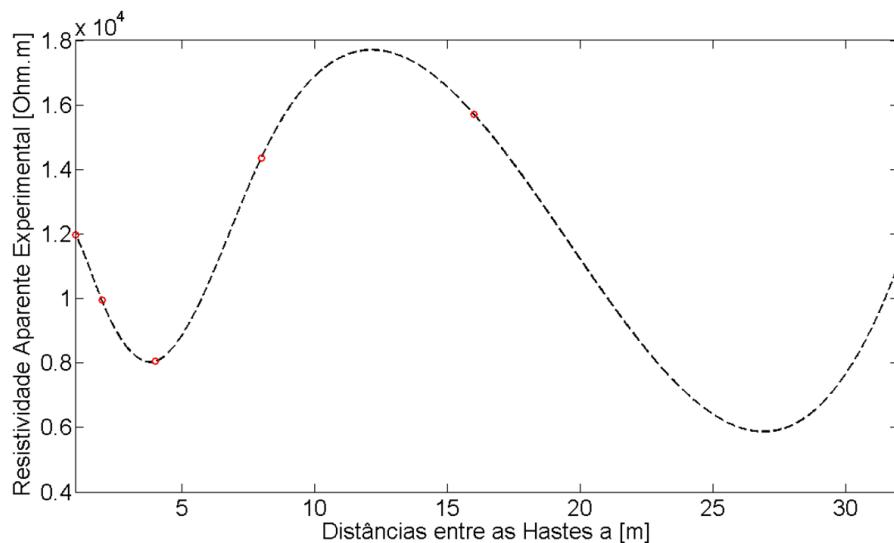


Figura 4.2 - Produção da curva $\rho_{aE}(a)$.

significar que há no local medido algum condutor enterrado, devendo este fato ser observado.

A profundidade dos eletrodos deve ser o suficiente para assegurar o contato dos mesmos com o solo, caso $a \geq 2 \text{ m}$. No entanto, $a < 2 \text{ m}$ a profundidade dos eletrodos poderá interferir em (2.5). Caso seja necessário, após cravar os eletrodos no solo, pode-se melhorar o contato dos mesmos utilizando água entre o eletrodo e o solo.

A resistividade do solo depende do tipo de solo e de suas condições naturais. Estas condições estão intimamente ligadas ao processo de intemperização, como: temper-

atura do solo e em alguns casos a salinidade (NBR 7117, 1981), (RHOADES; INGVALSON, 1971), (RAHIMI et al., 2005) e (SUDDUTH et al., 2005). A resistividade do solo também pode ser influenciada pela contaminação e a compactação.

As medidas devem ser realizadas, de preferência onde não há fontes de potenciais. Os eletrodos devem conter pontas e ser revestidos com material condutor não corrosível, possuindo resistência mecânica suficiente para ser cravado em solos duros. Os cabos que ligam o medidor de resistividade aos eletrodos não devem ficar enrolados, pois, isto provocará um efeito indutivo.

Com os z valores das resistividades aparente experimentais ρ_a obtidos por (2.6), e os z valores das distâncias entre os eletrodos a , produz-se a curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$, através da interpolação dos valores encontrados em campo (veja Fig. 4.2). Esta interpolação é feita com grupos de z pontos para obter-se um polinômio de baixo grau e, impondo condições para a função de Avaliação $f(\underline{x})$ ser contínua e ter derivadas contínuas até certa ordem.

4.2 Processo de Otimização das Curvas

A idéia aqui é encontrar um método de otimização que manipule os valores das resistividades ρ_i e das espessuras h_i de cada camada e do número de camada N . Estes valores deveram então ser manipulados através dos processos direto e inverso da estratificação horizontal do solo descrito nas Seção 3.3 e Seção 3.4.

Neste processo, a curva de resistividade aparente teórica $\rho_{aT}(N, \rho_i, h_i)$ será a cada iteração comparada com a curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$, e o desvio entre elas calculado por (3.30). Assim que o desvio entre as duas curvas, ou seja, $f(\underline{x}) \leq 10\%$, o algoritmo de otimização pára e os resultados da otimização deve conter como dado de saída os valores otimizados dos parâmetros N , ρ_i e h_i . Este processo é ilustrado na Fig. 4.3.

4.3 Método das Imagens Complexas

Para que se possa avaliar a metodologia proposta para estratificar o solo e se ter uma idéia sobre os desvios encontrados (erro) na estratificação do solo, será necessária a utilização de um método bastante difundido e muito utilizado em softwares de estratificação horizontal do solo em várias camadas.

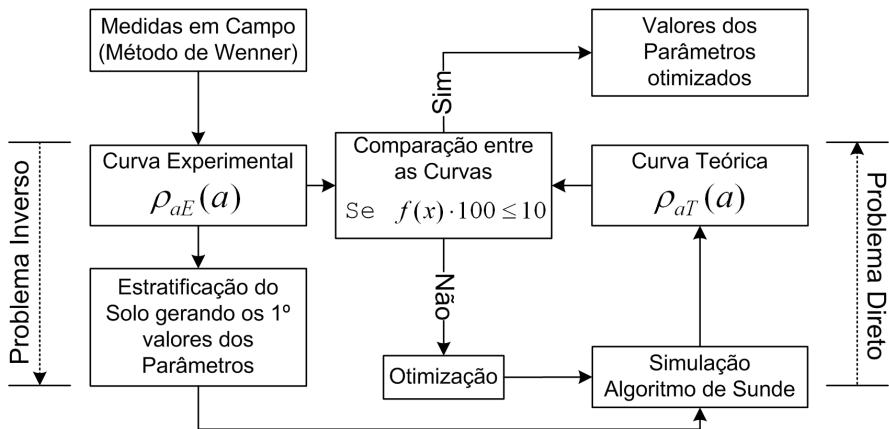


Figura 4.3 - Processo de otimização das curvas.

O método é conhecido como método das Imagens Complexas e é largamente utilizado em programas computacionais comerciais para projetos de malhas de aterramentos elétricos e estratificação do solo.

Este método foi proposto por (CHOW et al., 1992), que publicaram trabalhos de avaliação do desempenho de malhas de terra assentadas em solos estratificados em N -camadas usando imagens complexas com restrições, dentre as quais destacam-se a necessidade do posicionamento do eletrodo na primeira camada estratificada (YANG et al., 1992).

No método das imagens complexas, substitui-se a somatória das imagens infinitas, utilizado no método das imagens convencional, por um conjunto finito de imagens para solos estratificados em N -camadas, onde o número de imagens j é geralmente $j = N + 2$ ou $j = N + 3$. Esta abordagem provém da área de microondas onde os coeficientes e expoentes da série exponencial são associados aos resíduos e pólos da função de transferência de um sistema linear (PEREIRA FILHO; CARDOSO, 2001).

4.4 Método de Quase-Newton

O primeiro método eleito para otimizar o problema de estratificação do solo é o método de Quase-Newton (MQ-N). Os métodos Quase-Newton aplicados a problemas de otimização não-lineares, geram uma aproximação da derivada segunda da função de avaliação nos casos sem restrições, e da derivada segunda da Lagrangeana nos casos com restrições (ARENALES; DAREZZO, 2008). As técnicas de otimização de Quase-Newton normalmente geram matrizes definidas positivas. Um dos método

Quase-Newton mais utilizado é o *BFGS*, que obedece a condição secante (RUGGIERO; LOPES, 2006). Neste trabalho utiliza-se o método de Quase-Newton *BFGS*, esta denominação provém de seus idealizadores: *Broyden, Fletcher, Goldfrab e Shanno*.

Seja o problema:

$$\begin{aligned} & \min f(\underline{x}) \\ & \text{sujeito a :} \\ & x \in \Omega \subset \mathbb{R}^n \end{aligned} \tag{4.1}$$

onde Ω é o conjunto factível onde todos os pontos poderão ser solução do problema proposto, a função $f \in \Omega^2$, $F \in \mathbb{R}^{n \times n}$ e a Hessiana de $f(F = \nabla^2 \cdot f)$ e x é o vetor com as variáveis do problema a ser resolvido.

O método de Quase-Newton consiste em encontrar um novo ponto a cada iteração k , assim:

$$x_{k+1} = x_k - t_k \cdot S_k \cdot \nabla f(x_k). \tag{4.2}$$

Em (4.2) $S \in \mathbb{R}^{n \times n}$ é uma matriz simétrica, $\nabla f \in \mathbb{R}^n$ é o gradiente da função no ponto, e t_k é o valor escolhido de forma à minimizar $f(x_{k+1})$. Se $S = F^{-1}$ for a inversa da Hessiana, tem-se o método de Newton, no entanto, se $S = I_d$, onde I_d é a matriz identidade, tem-se o método da descida mais íngreme, "steepest descent" (DENNIS; SCHNABEL, 1983).

Através dos métodos Quase-Newton é possível obter uma aproximação $\mathbb{H} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ da inversa da matriz Hessiana, ao invés da exata exigida nos tradicionais métodos de Newton. Essa aproximação é feita obedecendo a condição secante descrita pela expressão:

$$\mathbb{H}_{k+1} \cdot y_k = s_k, \tag{4.3}$$

onde, de acordo com o problema que se quer solucionar (4.1), no caso sem restrições, tem-se os vetores s_k e y_k , dados por:

$$s_k = x_k - x_{k+1}, \quad (4.4)$$

$$y_k = \nabla f(x_k) - \nabla f(x_{k+1}). \quad (4.5)$$

Assim, para que $\mathbb{H} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ seja a aproximação da inversa da matriz Hessiana, tem-se que em cada iteração \mathbb{H}_{k+1} assuma a seguinte atualização:

$$\mathbb{H}_{k+1} = \mathbb{H}_k + \frac{s_k \cdot s_k^T}{s_k^T \cdot y_k} - \frac{\mathbb{H}_k \cdot y_k \cdot y_k^T \cdot \mathbb{H}_k}{y_k^T \cdot \mathbb{H}_k \cdot y_k}. \quad (4.6)$$

Agora, considerando uma matriz B a aproximação da Hessiana tal que $B = \mathbb{H}^{-1}$, tem-se em (4.7) a condição secante, que é uma das condições que define o método de Quase-Newton.

$$B_{k+1} \cdot s_k = y_k, \quad (4.7)$$

manipulando algebricamente as expressões de (4.3) à (4.7), tem-se (NOCEDAL; WRIGHT, 1999):

$$B_{k+1} = B_k - \frac{B_k \cdot s_k \cdot s_k^T \cdot B_k}{s_k \cdot B_k \cdot s_k^T} + \frac{y_k \cdot y_k^T}{y_k^T \cdot s_k}. \quad (4.8)$$

A expressão (4.8) é uma atualização da matriz B e é denominada atualização *BFGS* de B .

Uma outra forma de atualização de \mathbb{H} é a inversão da B_{k+1} ,

$$\mathbb{H}_{k+1} = \mathbb{H}_k + \left(1 + \frac{y_k^T \cdot \mathbb{H}_k \cdot y_k}{y_k^T \cdot s_k} \right) \cdot \frac{s_k \cdot s_k^T}{s_k^T \cdot y_k} - \frac{s_k \cdot y_k^T \cdot \mathbb{H}_k + \mathbb{H}_k \cdot y_k \cdot s_k^T}{y_k^T \cdot s_k}. \quad (4.9)$$

Na expressão (4.9), para determinar \mathbb{H}_{k+1} utiliza-se a fórmula de Sherman-Morrison, esta expressão também é denominada de regra de atualização *BFGS* da matriz \mathbb{H} . Nos problemas sem restrições a atualização *BFGS* produzirá uma matriz B_{k+1}

simétrica, definida positiva sempre que a matriz B_k seja definida positiva e que se verifique a condição de secante dada por (4.7) e a condição de curvatura dada por:

$$s_k^T \cdot y_k > 0. \quad (4.10)$$

Em problemas com restrições o vetor y_k é obtido da seguinte maneira:

$$y_k = \nabla_x \mathbb{L}(x_{k+1}, \lambda_{k+1}) - \nabla_x \mathbb{L}(x_k, \lambda_k). \quad (4.11)$$

Em (4.11), \mathbb{L} é a Lagrangeana da função de avaliação e λ é o vetor dos multiplicadores de Lagrange. Nos problemas com restrições, a Hessiana exata do problema não é necessariamente definida positiva na solução (NOCEDAL; WRIGHT, 1999). Portanto, nestes casos, nem sempre é possível garantir que a matriz B obtida através da atualização *BFGS* dada por (4.9), seja definida positiva, assim, para superar esta dificuldade, Powell (POWELL, 1978), propôs uma modificação da atualização *BFGS* apenas para problemas com restrições onde a matriz B não seja definida positiva, que é:

$$s_k^T \cdot y_k < 0.2 \cdot s_k^T \cdot B_k \cdot s_k, \quad (4.12)$$

assim define-se:

$$\phi = \frac{0.8 \cdot s_k^T \cdot B_k \cdot s_k}{s_k^T \cdot B_k \cdot s_k - s_k^T \cdot y_k}, \quad (4.13)$$

e com o cálculo de ϕ , obtém um novo y_k , mantendo o mesmo s_k . O novo y_k é obtido utilizando a seguinte expressão:

$$y_k = \phi \cdot y_k + (1 - \phi) \cdot B_k \cdot s_k. \quad (4.14)$$

Por último, com novos vetores y_k , s_k e B_k , tem-se em (4.8) a atualização de B_{k+1} . O método de Quase-Newton foi escolhido entre outros métodos para resolver o problema da estratificação do solo, por ter como proposta inicial evitar o cálculo da

Jacobiana da função f aplicada no ponto x , isto é, $J(f(x_k))$ em cada iteração. O que o método de otimização de Quase-Newton realmente proporciona é uma aproximação por uma matriz B_k , reduzindo assim o número de operações realizadas por iteração, no sentido de manter ao máximo as propriedades de convergência ([CALIXTO et al., 2009](#)).

O método de Quase-Newton será aplicado no processo de otimização dos parâmetros da estratificação e seu resultados serão comparados com os resultados obtidos com o método das Imagens Complexas, estes resultados estão disposto nas Seção 5.1 à Seção 5.3.

4.5 Algoritmo Genético (AGCR)

O outro método eleito para solucionar o problema de estratificar o solo em camadas horizontais é um método heurístico, algoritmo genético (*AG*). Escolhe-se um algoritmo genético por ser dependente de fatores estocástico e independente de derivadas ([MICHALEWICZ; FOGEL, 1999](#)). O algoritmo genético é uma técnicas de otimização evolucionárias que são técnicas heurísticas, usadas em problemas onde técnicas utilizando algoritmos exatos são incapazes de obter soluções satisfatórias ou levar a um tempo infinito ([CALIXTO et al., 2010](#)).

Define-se um algoritmo genético como sendo: um ramo dos Algoritmos Evolucionários, com uma técnica de busca baseada numa metáfora do processo biológico de evolução natural ([LINDEN, 2006](#)).

Nos algoritmos genéticos, populações de indivíduos são criadas e submetidas aos operadores genéticos. Estes operadores utilizam características mensuradas na qualidade de cada indivíduo (*Aptidão*) em relação ao meio em que ele está inserido, sendo cada indivíduo uma possível solução para o problema proposto. A medida da qualidade de cada indivíduo é chamada de avaliação, e gera um processo de evolução natural destes indivíduos que eventualmente irá gerar outro indivíduo melhor adaptado ao meio onde ele está inserido, combinando a sobrevivência entre os melhores com uma forma estruturada de troca de informações genéticas entre os indivíduos da população, formando uma heurística de busca.

Ao executar um algoritmo genético uma população de indivíduos, que representa um conjunto de possíveis soluções do problema, é submetida a uma série de transformações. Cada ciclo de avaliação constitui-se uma geração, e espera-se que o algoritmo

genético, ao fim de um número razoável de gerações, apresente um candidato ótimo ou que o melhor indivíduo seja uma solução otimizada. A estrutura genérica de um algoritmo genético clássico pode ser sintetizada como ilustrado na Fig. 4.4.

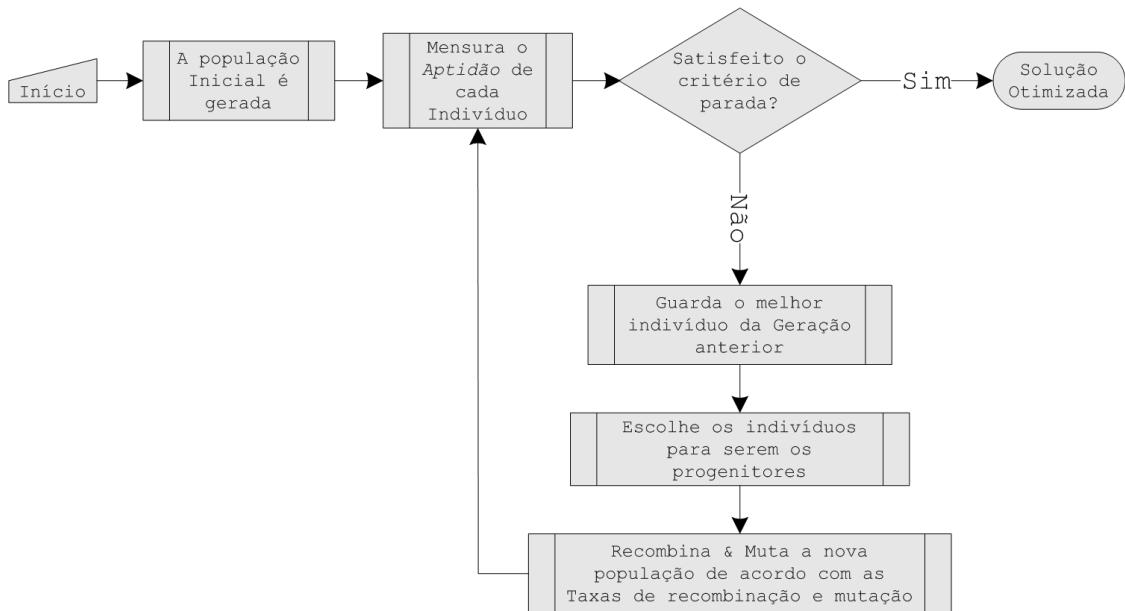


Figura 4.4 - Algoritmo genético clássico.

Os algoritmos genéticos requerem que as variáveis dos problemas a serem otimizados sejam codificadas em um cromossomo de comprimento finito. A técnica clássica de codificação dos algoritmos genéticos utiliza-se strings de bits a fim de representar os cromossomos. Porém, com a necessidade de maior precisão numérica, as cadeias de bits se tornam excessivamente longas, levando a um esforço computacional maior e com isto o aumento do tempo de execução (HERRERA et al., 1998).

Utiliza-se neste trabalho um Algoritmo Genético com Codificação Real (AGCR), o que torna possível fazer uma maior exploração em um tempo menor, o que é difícil de conseguir com as cadeias binárias (CALIXTO et al., 2010). Duas outras vantagens na utilização de codificação real são: i) a capacidade de explorar gradualmente as funções com variáveis contínuas; ii) nas cadeias binárias existe a necessidade da conversão dos bits para um valor numérico (HERRERA et al., 1998).

O AGCR utilizado tem as seguintes características:

- População Inicial: para este trabalho, como na maioria dos algoritmos genéticos, a população inicial é gerada aleatoriamente (NEDJAH et al., 2006). Em alguns casos particulares, pode-se iniciar o algoritmo genético com uma população inicial já evoluída ou uma população inicial gerada por um algoritmo de inicialização em direção ao ótimo. É imprescindível saber previamente o tamanho da população inicial, que deve ser grande o suficiente para criar diversidade, ao mesmo tempo em que não seja grande demais para tornar o processo excessivamente lento.

Neste trabalho, serão geradas duas populações, uma de resistividade de cada camada do solo ρ_i e outra com as espessuras de cada camada do solo h_i . Estas duas populações deverão coexistir por serem de dimensões e unidades diferentes. No entanto, no momento da aplicação da função de avaliação elas devem se juntar formando apenas uma população, como ilustrado na Fig. 4.5.

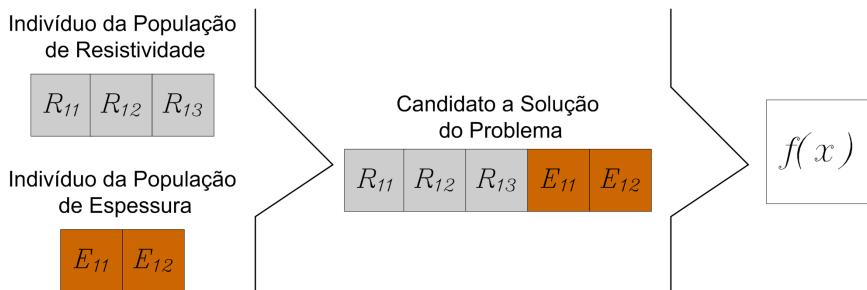


Figura 4.5 - Construção de um indivíduo da população.

- Função de Avaliação: para que os algoritmos genéticos sejam executados é necessário ter definida uma função de avaliação, a qual irá mensurar a aptidão (*fitness*) de cada indivíduo (HOLLAND, 1975). A função de avaliação é uma das estruturas mais importantes para o problema a ser resolvido pelo algoritmo genético, uma vez que ela é específica para cada aplicação e deve avaliar o comportamento dos cromossomos no ambiente ao qual ele está inserido (REZENDE, 2005). Pode-se compreendê-la melhor se definida da seguinte maneira: a função de avaliação é a nota dada para a qualidade de cada indivíduo na resolução do problema (CALIXTO et al., 2010).

Nesta função deve estar embutido todo o conhecimento que se possui sobre o problema a ser resolvido; a função de avaliação, também chamada de função de custo, calcula então um valor que reflete quão “bem” as variáveis representadas nos cromossomos resolvem o problema (LINDEN, 2006). Neste trabalho, para mensurar e avaliar quanto um indivíduo está melhor adaptado em relação a outros indivíduo, utiliza-se o algoritmo de Sunde como simulador e a expressão (3.30), como função de avaliação.

- Seleção por Torneio: consiste em selecionar uma série de indivíduos da população e fazer com que eles entrem em competição, usando como critério o valor da função de avaliação (aptidão) de cada indivíduo (BÄCK, 1996). Neste método é necessário definir um parâmetro τ denominado tamanho do torneio, que define quantos indivíduos serão selecionados dentro da população corrente, para participar por vez do torneio (BÄCK et al., 2000).

Uma vez definido τ , escolhem-se aleatoriamente dentro da população os participantes do torneio. Após definido os competidores, escolhe-se dentre eles o que tiver a melhor aptidão para ser um dos progenitores da nova população. $\tau = 2$ assume o valor mínimo, no entanto, não há nenhum limite teórico para o valor máximo deste parâmetro. Embora o valor máximo não deva exceder a um valor muito próximo de m , onde m é o número de indivíduos da população, pois se $\tau = m$, o vencedor será sempre o melhor indivíduo. Na literatura existem alguns trabalhos que indicam valores que variam entre dois e cinco (GOLDBERG, 1989).

Os indivíduos são selecionados para participar do torneio de forma completamente aleatória e não existe favorecimento para indivíduos mais aptos como no caso de outros operadores de seleção. A única vantagem que os melhores indivíduos têm em relação aos outros indivíduos da população é que, se selecionados, vencerão o torneio é serão os progenitores da nova população (BÄCK et al., 2000).

- Elitismo: o método de elitismo previne que os melhores indivíduos se perca, ou seja, que eles não corram o risco de desaparecerem pela manipulação dos operadores genéticos ou, eventualmente, não sejam selecionados pelo método de seleção, haja vista, que o método de seleção é completamente aleatório (GOLDBERG, 1989).

Este método garante que o desempenho do algoritmo genético cresça no

decorrer das gerações. O melhor indivíduo de cada geração não deve ser substituído junto à sua geração, mas sim passar para a próxima geração visando garantir que seus genes sejam preservados. A manutenção do melhor indivíduo da geração g , na população da nova geração $g + 1$, garante pelo menos uma avaliação igual ao melhor indivíduo da geração g anterior, no pior caso em que nenhum indivíduo melhor na geração $g + 1$ seja gerado.

- Operador de Cruzamento ou Recombinação: combina os genes de dois ou mais indivíduos (*crossover*), permitindo que os indivíduos das gerações $g + 1$ herdem as características dos indivíduos das gerações anteriores. A idéia intuitiva por trás deste operador é a troca de informação entre diferentes soluções candidatas (cromossomo). O operador de recombinação tem um papel importante no algoritmo genético, pode-se considerá-lo como uma das estruturas que definem a eficiência do algoritmo genético. Nos casos dos AGCR, estes operadores influem decisivamente sobre o nível de diversidade da população e são fatores determinantes para evitar o problema de convergência prematura ([HERRERA et al., 2003](#)).

Neste trabalho utiliza-se o *Simple Crossover* ([MICHALEWICZ, 1992](#)): Sejam $\gamma_i = [c_{i1} \ c_{i2} \ \dots \ c_{i(n-1)} \ c_{in}]$ e $\gamma_j = [c_{j1} \ c_{j2} \ \dots \ c_{j(n-1)} \ c_{jn}]$ dois cromossomos da população corrente, escolhidos aleatoriamente, onde n é o número de genes do cromossomo. Escolhe-se uma variável probabilística binária de decisão v , de tal modo que, se $v = 1$ trocam-se os genes c_{im} e c_{jm} , obtendo-se dois novos cromossomos $\gamma_i'' = [c_{i1} \ c_{i2} \ \dots \ c_{i(n-1)} \ c_{jn}]$ e $\gamma_j'' = [c_{j1} \ c_{j2} \ \dots \ c_{j(n-1)} \ c_{in}]$. Se $v = 0$, não se troca os genes. Desta forma a nova prole é construída. Este operador de cruzamento tem uma peculiaridade que é poder a partir de dois progenitores, gerarem múltiplos descendentes.

- Operador de Mutação: este operador genético introduz variabilidade dentro da população. Ele consiste em arbitrariamente alterar o valor de determinados genes de um indivíduo. A idéia intuitiva por trás do operador de mutação é criar uma diversidade extra na população, sem destruir o progresso já obtido com a busca. O operador de mutação garante a diversidade das características dos indivíduos da população e permite que sejam introduzidas informações que não estiveram presentes em nenhum dos indivíduos. Proporciona uma busca aleatória (*exploration*) no algoritmo genético, oferecendo oportunidade para que mais pontos sejam avaliados.

Nos casos dos AGCR, estes operadores provocam uma perturbação no ponto, ou seja, no valor do genes. Nas primeiras gerações estas perturbações podem ser relativamente grandes e devem diminuir de acordo vão passando as gerações, ocasionando um ajuste fino em direção ao indivíduo otimizado. Neste trabalho utiliza-se o *Non-Uniform Mutation* ([MICHALEWICZ, 1992](#)): Assuma que $\gamma_m = [c_{m1} \ c_{m2} \ \dots \ c_{m(n-1)} \ c_{mn}]$ é o m-ésimo indivíduo (cromossomo) da população de uma certa geração, onde m é o número de indivíduos da população. Suponha que $c_{mi} \in [a, \ b]$ é o gene a ser mutado. Se o operador de mutação é aplicado à geração g e g_{max} é o número máximo de gerações, então o gene mutado será dado por,

$$c'_{mi} = \begin{cases} c_{mi} + \Delta(g, b - c_{mi}) & \text{if } v = 0 \\ c_{mi} - \Delta(g, a + c_{mi}) & \text{if } v = 1, \end{cases} \quad (4.15)$$

onde:

$$\Delta(g, y) = y (1 - r^{(1 - \frac{g_{max}}{g})^\theta}), \quad (4.16)$$

onde r é um número aleatório no intervalo $]0, 1]$, θ é um parâmetro a ser escolhido que determina o grau de dependência do número de gerações e $\Delta(g, y)$ retorna um valor no intervalo $(0, y]$ tal que a probabilidade de retornar um número próximo de zero aumenta à medida que as gerações vão aumentando. A perturbação provocada no valor do gene por este operador de mutação é menor com o passar das gerações g . Esta propriedade faz com que este operador faça uma busca uniforme no espaço inicial quando g é pequeno, e uma busca próxima dos valores dos genes quando $g \rightarrow g_{max}$, favorecendo o ajuste local, ou seja, um ajuste fino.

4.5.1 Operador Matemático Proposto (OED)

Neste trabalho é proposto um operador para acelerar a convergência de um processo de otimização. Este operador é denominado de Operador de Evolução Dirigido (OED), tem o objetivo de acelerar o processo de convergência de um AGCR, na busca de um indivíduo otimizado. O OED consiste de um operador genético que faz uso de uma função interpoladora-extrapoladora ([CALIXTO et al., 2010](#)).

Consideremos o AGCR definido anteriormente aplicado a um processo de otimiza-

ção. A função interpoladora-extrapoladora, denotada por E , será definida após cada determinado intervalo de gerações. Em cada um desses intervalos, denotamos por:

$$M_I = [c_{i,j}]_{m \times n}, \quad (4.17)$$

a matriz cuja linha $\gamma_i = [c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,n}]$, $i = 1, 2, \dots, m$, é formada pelos genes do melhor indivíduo da geração, onde este melhor indivíduo é melhor do que todos os melhores indivíduos das gerações anteriores. Neste caso, a função de avaliação do AGCR, denotada por F , será sempre estritamente decrescente quando calculada nas linhas de M_I . Isto é, $F(l_{i+1}) < F(l_i)$, $i = 1, \dots, m-1$. Assim, o número m de linhas de M_I , é igual ao número de gerações onde foi encontrado um indivíduo melhor, com valores estritamente decrescentes da função de avaliação. O número n de colunas de M_I representa o número de genes do melhor indivíduo da geração.

Denotamos por $c_j = [c_{1,j}, c_{2,j}, \dots, c_{m,j}]^T$ a j -ésima coluna da matriz M_I , e por $x_i = F(l_{m+1-i})$, $i = 1, 2, \dots, m$, os valores em ordem crescente da função de avaliação calculados nas linhas de M_I . Assim, temos que,

$$F(l_m) = x_1 < x_2 < \dots < x_n = F(l_1). \quad (4.18)$$

Para cada coluna c_j de genes da matriz M_I é definida uma função interpoladora-extrapoladora E_j do seguinte modo: o domínio de E_j deve ser um intervalo fechado $[q', r']$, contendo todos os valores da função de avaliação calculados nas linhas de M_I , isto é, contendo os valores x_1, \dots, x_n . O extremo superior r' do intervalo, sem perda de generalidade, pode ser igual a $x_n = F(l_1)$. O extremo inferior q' deve ser definido aleatoriamente, de tal modo que,

$$q' < F(l_m) \cdot \varphi, \quad (4.19)$$

onde $1 - \varphi$ é o percentual de progresso desejado, o qual deve ser menor que o menor valor da função de avaliação no intervalo de gerações considerado. A imagem de E_j deve conter todos os genes da coluna c_j , de tal modo que,

$$E_j(x_i) = y_{ij}, \quad (4.20)$$

onde $y_{ij} = c_{(m+1-i)j}$, $i = 1, 2, \dots, m$.

Finalmente, a função E_j é definida através de uma interpolação suave entre os pontos (x_i, y_{ij}) e $(x_{i+1}, y_{(i+1)j})$, $i = 1, 2, \dots, m-1$ e uma extrapolação para o subintervalo $[q', x_1]$ do domínio. O valor $E_j(q')$ é o gene melhorado na posição j correspondente ao intervalo de gerações considerado. Este novo gene é chamado gene extrapolado, quadrado azul da Fig. 4.6.

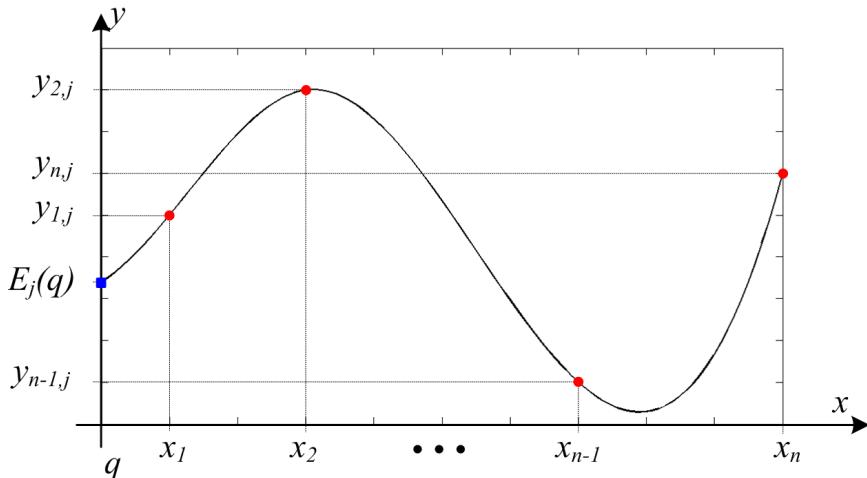


Figura 4.6 - $E_j(q')$, gene extrapolado na posição j correspondente ao intervalo de gerações considerado.

Vários métodos de extrapolação podem ser considerados, como por exemplo, pedaços cúbicos de polinômios, spline cúbica etc. Em (4.18) aparece uma imposição onde, de uma geração g para uma geração $g+1$, se não for gerado um novo indivíduo melhor, caso que ocorre com frequência nos $AG's$, não se deve guardar em M_I o mesmo indivíduo da geração g anterior, pois, isto ocasionaria um problema numérico ao proceder a extrapolação. Observe que neste caso o valor de $f(\underline{x})$ será o mesmo do indivíduo anterior.

O Operador Evolução Dirigida (OED) permite construir um novo conjunto de dados a partir de um conjunto discreto de dados pontuais previamente conhecidos nos cromossomos de cada indivíduo, garantindo uma continuidade e carregando os padrões

intrínsecos de cada gene para um único gene. Na Fig. 4.7 ilustra um exemplo da aplicação do operador OED. Observa-se nesta figura que cada linha contém a geração g , o valor da função de avaliação $f(\underline{x})$ dos melhores indivíduos de cada geração g e os genes que formam os indivíduos que serão as possíveis solução do problema. Examinando apenas as colunas dos genes $c_{m,n}$, onde m é o número de indivíduo (linha da matriz) e n o número de gene no cromossomo (coluna da matriz), que nas gerações iniciais os valores assumidos por $c_{m,n}$ são bastante variáveis, ou seja, não há padrão algum. A partir de uma determinada geração $g + 1$, quando o valor de $f(\underline{x})$ de cada indivíduo começa a aproximar da função de avaliação desejada $f(x^*)$, os valores dos genes $c_{m,n}$ começam a apresentar valores com alguns padrões. Quando a partir de uma determinada geração, a diversidade da população tende a decrescer, o OED tem condições de encontrar um indivíduo melhor considerando o padrão assumido nas colunas n de cada gene.

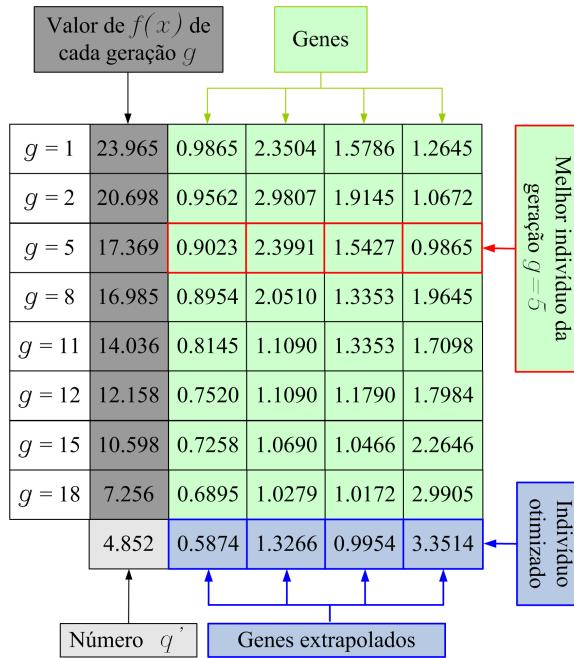


Figura 4.7 - Ilustração do OED.

Este padrão é o crescimento ou o decrescimento dos valores assumidos pelos $c_{m,n}$ (Fig. 4.7). O OED reconhece este padrão, calculando o valor do próximo gene $c_{m+1,n}$, dado os valores anteriormente assumidos de todos os genes naquela determinada posição n .

Desta forma, o valor encontrado através da extrapolação para cada gene $c_{m+1,n}$, forma um novo indivíduo com aptidão controlada, para a nova geração $g + 1$. O número q' escolhido aleatoriamente é ilustrado na última linha na coluna 2 da Fig. 4.7, $q' = 4.852$, onde o valor da função de avaliação do último melhor indivíduo é $F(l_m) = 7.256$, penúltima linha da coluna 2, para $g = 18$.

Pode-se utilizar qualquer método de extrapolação no OED, no entanto, o operador terá um desempenho melhor de acordo com o método de extrapolação utilizado, que deve variar de acordo com o problema a ser resolvido. A proposta deste operador restringe-se a utilizar apenas dois métodos de extrapolação para uma breve comparação entre os resultados. O primeiro método a ser utilizado é a extrapolação spline cúbica (ESC) (BOOR, 2001; SCHUMAKER, 2007). O segundo método é da extrapolação por pedaços cúbicos de polinômios (EPCP). Estes métodos preservam a monotonicidade e a forma dos dados (FRITSCH; CARLSON, 1980; COLLINS, 1999). As Fig. 4.8 e Fig. 4.9 ilustram as extrapolações obtidas para os mesmos valores apresentados na Fig. 4.7.

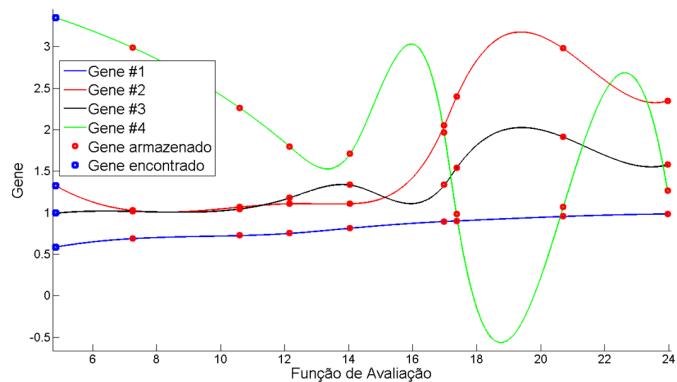


Figura 4.8 - Extrapolação spline cúbica obtida para os genes da Fig. 4.7.

Na Tab 4.2 estão disposto os resultados encontrados pelos métodos ESC Fig. 4.8 e EPCP Fig. 4.9 utilizados no exemplo ilustrativo.

Observa-se na Tab 4.2 que para este problema específico, a ESC teve um melhor resultado com um valor da função de avaliação $f(\underline{x})$ menor. O indivíduo gerado pelo OED deve assumir o lugar de outro indivíduo, que será retirado da população aleatoriamente.

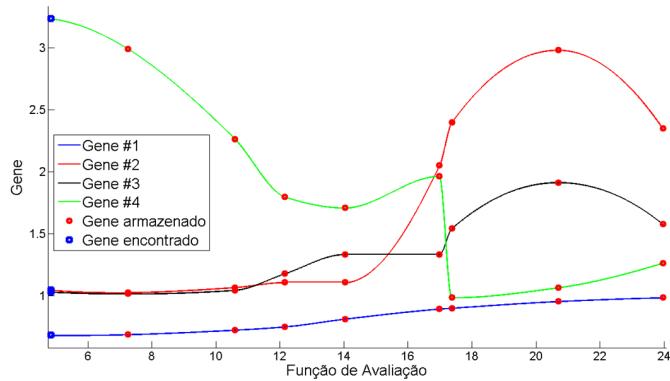


Figura 4.9 - Extrapolação por pedaços cúbicos de polinômios obtida para os genes da Fig. 4.7.

Tabela 4.2 - Valores encontrados para os genes usando dois métodos de extrapolação.

Método	q'	$f(\underline{x})$	$c_{m+1,1}$	$c_{m+1,2}$	$c_{m+1,3}$	$c_{m+1,4}$
ESC	4,852	5,241	0,5874	1,3266	0,9954	3,3514
EPCP	4,852	5,829	0,6842	1,0479	1,0322	3,2339

Quando o valor de q' gerado está próximo do valor da última função de avaliação obtida $F(l_m)$, os dois métodos de extrapolação encontram valores muito próximos. Se o valor de q' estiver afastando do valor de $F(l_m)$, os resultados entre os dois método de extrapolação tendem a se distanciarem. Isto ocorre porque, quando os vetores formados pelos valores de $c_{m,n}$, tem valores para produzir uma curva razoavelmente suave, a extrapolação splines cúbicas produz uma boa solução, como é o caso do exemplo ilustrado. Caso contrário, a curva originária, pode resultar de funções com novos máximos e mínimos muito distantes dos dados originais, o que entre outras coisas, pode destruir a monotonicidade destes dados (COLLINS, 1999). A escolha de qual método de extrapolação deve ser utilizado fica como mais um parâmetro do AG a ser definido.

4.5.2 Taxas, Critérios de Parada e Pseudo Código do AGCR

- Taxa de Recombinação: é o valor P_r que define qual a probabilidade de haver recombinação em uma determinada geração. Quanto maior a taxa de recombinação, mais rapidamente novas estruturas serão inseridas na população. Mas se for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser perdidas mais rapidamente que a capacidade da seleção em criar melhores

estruturas. Se a taxa for muito baixa, a busca pode ficar estagnada. Na literatura esta taxa é variável podendo assumir um valor de $P_r = 80\%$ na primeira geração, diminuindo no decorrer das gerações até assumir um valor $P_r = 30\%$ na geração final.

- Taxa de Mutação: é o valor P_m que define qual a probabilidade de haver mutação em uma determinada geração. O operador de mutação tem como objetivo evitar a estagnação em sub-regiões do espaço de busca. Isto possibilita que qualquer ponto do espaço de busca seja atingido. Com uma taxa de mutação muito alta, a busca se torna essencialmente aleatória. Na literatura, esta taxa é variável podendo assumir um valor de $P_m = 1\%$ na primeira geração, aumentando no decorrer das gerações até assumir um valor $P_m = 40\%$ na geração final.
- Critérios de Parada: diferentes critérios de parada podem ser utilizados. Por exemplo, após um dado número de gerações ou quando o valor da função de avaliação for um valor otimizado. Outros critérios de parada para o algoritmo genético utilizados na literatura são: quando a aptidão do melhor indivíduo não melhorar após um número de gerações; quando as aptidões dos indivíduos de uma dada população tornar-se muito parecida e outros. Neste trabalho utilizam-se os dois primeiros critérios, quando $g = 100$ e/ou quando $f(\underline{x}) \leq 10^{-3}$.
- Pseudo Código do AGCR. A seguir uma exemplificação detalhada do AGCR utilizado. As estruturas são as mesma de um algoritmo genético clássico e os operadores de cruzamento, mutação e evolução orientada são os descritos anteriormente, o mecanismo de seleção utilizado foi o torneio.

```

begin
   $g = 1$ 
  function generate initial population  $P(g = 1)$ 
  function evaluate  $P(g = 1)$ 
  while (no stopping criterion satisfied)
    begin
       $g = g + 1$ 
      function select  $P(g)$  from  $P(g - 1)$ 
      selection by tournament
      function crossover  $P(g)$ 
      function mutation  $P(g)$ 
      function evaluate  $P(g)$ 
      if  $g = \text{multiple of a set value}$ 
        function OED  $P(g)$ 
      end
    end
  end

```

Pseudo Código do AGCR ([HERRERA et al., 1998](#)).

Os algoritmos genéticos têm adquirido crescente importância como mecanismo de otimização nos últimos anos, em virtude de serem ferramentas genéricas de otimização que buscam com eficiência os mínimos globais de funções com elevado grau de complexidade ([LINDEN, 2006](#)). São flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes. São também facilmente hibridizados com outras técnicas e heurística ([MICHALEWICZ; FOGEL, 1999](#)) e ([LÜCK; EISENREICH, 2001](#)).

O algoritmo genético será aplicado no processo de otimização dos parâmetros da estratificação do solo e seus resultados serão comparados com os resultados obtidos com o método de Quase-Newton e com o método das Imagens Complexas, estes resultados estão dispostos no Capítulo 5.

4.6 Estratificação Tridimensional

O processo de estratificação tridimensional foi modelado com o intuito de visualizar e identificar com precisão as camadas do solo estratificado.

A fim de obter uma estratificação do solo em 3D, deve-se fazer uma discretização regular na área a ser estratificada, isto é, dividir em pequenas subáreas $S_{i,j}$ de $M \times M$ metros, como ilustrado na Fig. 4.10.

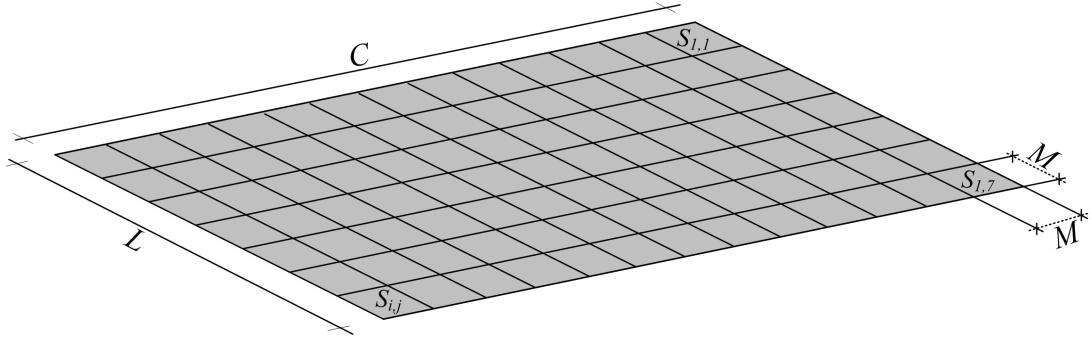


Figura 4.10 - Discretização da área escolhida para a estratificação.

As subáreas $S_{i,j}$ podem ser identificadas no sentido C pelos vetores $\vec{t}_{i,j}$ e no sentido L pelos vetores $\vec{v}_{i,j}$, que representam suas arestas, assim,

$$S_{i,j} \implies \vec{t}_{i,j} \vec{v}_{i,j}, \vec{t}_{i,j+1} \vec{v}_{i+1,j}. \quad (4.21)$$

A expressão (4.21) é ilustrada na Fig. 4.11, onde o método de Wenner é aplicado sob cada aresta $\vec{t}_{i,j}$ e $\vec{v}_{i,j}$ das subáreas $S_{i,j}$.

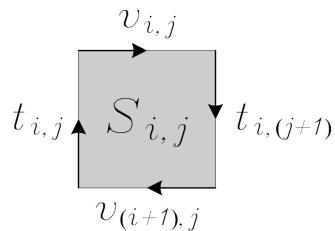


Figura 4.11 - Formação das subáreas $S_{i,j}$.

Desta forma, ao se aplicar o método de Wenner em cada aresta das subáreas, discretiza-se de forma global a área $L \times C$. A quantidade de locais a ser aplicado o método de Wenner é dado por:

$$T(t, v) = 2(t \cdot v) + t + v \quad (4.22)$$

onde v e $t \in \mathbb{N}$ | $v = \frac{L}{M}$ e $t = \frac{C}{M}$. C e L são os comprimento e largura, como apresentado na Fig. 4.10. Nota-se que C e L devem ser múltiplos de M .

Assim, cada aresta t e v é estratificada e uma média desta estratificação é então obtida para cada subárea, considerando o solo constituído por camadas homogêneas. Os parâmetros N , ρ_i e h_i são encontrados para todas as subáreas utilizando o método descrito no Capítulo 3.

Para fins de visualização, os valores encontrados para as espessuras das camadas do solo estratificado podem ser interpoladas utilizando um interpolação *splines* cúbica (ARENALES; DAREZZO, 2008) e (RUGGIERO; LOPES, 2006), onde os pontos de controle atribuídos a interpolação estão sobre as arestas de cada subárea, como mostrado na Fig. 4.12.

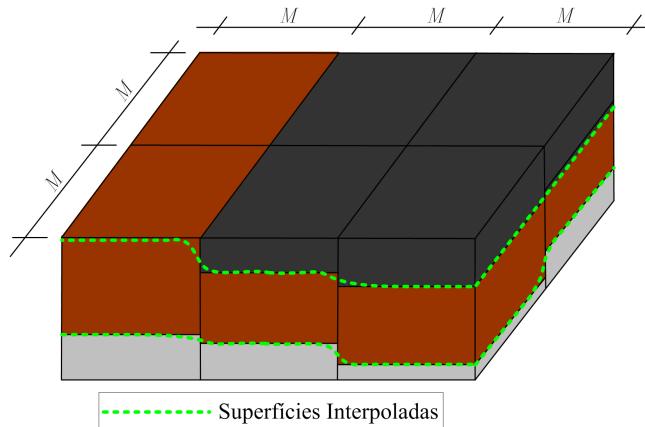


Figura 4.12 - Interpolação das superfícies de separação.

A Fig. 4.12 ilustra uma provável interpolação entre as superfícies de separação das camadas de toda a subárea, através de um conjunto de pontos (nas arestas das subáreas) ao longo de L e C .

Ao final do processo de estratificação 3D, um representante global de resistividade $\bar{\rho}_i$ e da espessura \bar{h}_i são encontrados para cada camada i , correspondentes aos valores médios da resistividade ρ_i e espessura h_i de cada camada de todas as subáreas.

No processo de cálculo dos representantes globais de ρ_i e de h_i utiliza-se o desvio padrão amostral s_a (WELTNER et al., 2009), onde o desvio padrão para uma amostra de $T(t, v)$ valores de h_i pode ser assim calculado:

$$s_a(\bar{h}_i) = \sqrt{\frac{1}{T(t, v) - 1} \cdot \sum_{i=1}^{T(t, v)} (h_i - \bar{h})}. \quad (4.23)$$

A divisão por $T(t, v) - 1$ aparece quando é exigido uma variância amostral com um estimador não tendencioso da variância populacional. Os valores do desvio padrão amostral podem ser apresentados em uma tabela ou em uma forma gráfica, de maneira que se exponha os valores dos desvios padrão das profundidades d_i , dada por (4.24), e de forma à quantificar a dispersão desses valores entre as diferentes subáreas, como apresentado na Fig. 4.13,

$$d_i = \sum_{j=1}^i h_j. \quad (4.24)$$

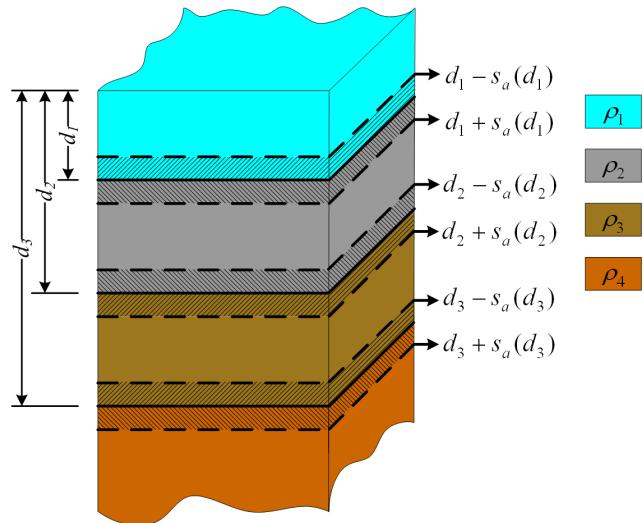


Figura 4.13 - Representação das profundidades e seus desvios padrão.

A diferença entre a curva experimental $\rho_{aE}(a)$ e a curva teórica $\rho_{aT}(a)$ dada por $f(\underline{x})$ em (3.30), quantifica a qualidade obtida de uma dada estratificação (CALIXTO et al., 2010b). Partindo do pressuposto que uma área $L \times C$ é um conjunto de várias

estratificações, pode-se mensurar o erro médio no processo de estratificação global de todas as subáreas, que corresponde à média dos valores de $f(\underline{x})$ calculados para todas as arestas. Desta forma tem-se que o erro global médio E_g de uma estratificação 3D é dado por:

$$E_g = \sum_{i=1}^{v+1} \sum_{j=1}^{t+1} f(\underline{x}_{ij}) \cdot \frac{1}{T(t, v)}. \quad (4.25)$$

na expressão (4.25) t e v são os números de subáreas nos sentidos C e L .

Além da possível representação dada pela Fig. 4.13, pode-se visualizar uma estratificação 3D de outras formas. A Fig. 4.14 ilustra uma estratificação onde cada subárea é graficamente representada pelas suas profundidades de camadas d_i e a Fig. 4.15 ilustra uma estratificação onde as espessuras das camadas h_i foram interpoladas e as superfícies de separação entre as camadas são graficamente representada pelas suas profundidades d_i , separando as resistividades ρ_i e ou as condutividades σ_i entre as camadas.

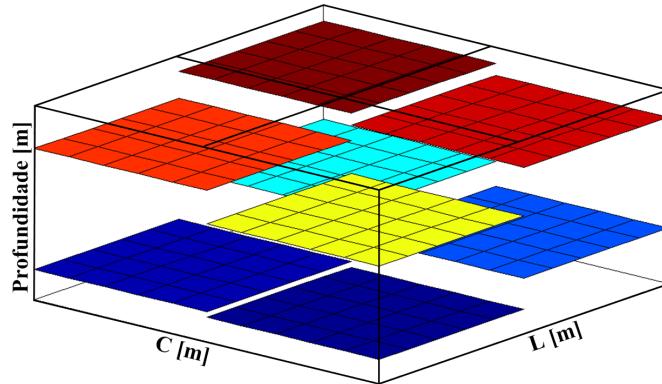


Figura 4.14 - Representação gráfica das profundidades.

Os resultados obtidos de áreas estratificadas utilizando a metodologia descrito para estratificação tridimensional estão disposto na Seção 5.4.

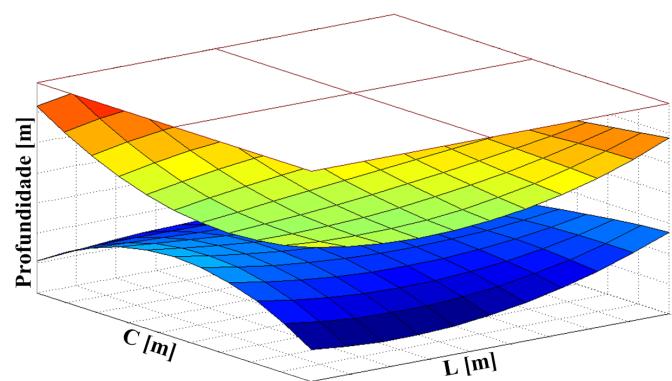


Figura 4.15 - Representação das superfícies de separação entre as camadas.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÕES E RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados todos os resultados obtidos pelas metodologias propostas. Estes resultados são disposto em tabelas e gráficos e estão apresentados na ordem em que foram exposto no Capítulo 4. Em todas as seções existe ao menos um resultado de comparação entre os métodos explicitados anteriormente, ou seja, métodos das Imagens Complexas (MIC), método de otimização de Quase-Newton (MQ-N) e o algoritmo genético proposto (AGCR). Ao final de cada seção são feitos alguns comentários sobre os resultados obtidos.

5.1 Aplicação do Método de Quase-Newton

O método de otimização de Quase-Newton foi aplicado na estratificação horizontal do solo e alguns dos resultados obtidos estão aqui dispostos. São apresentados resultados de quatro casos processados.

5.1.1 Estudo de Caso 1

A Tab. 5.1 apresenta os valores das resistividades aparentes experimental e teórica, assim como os desvios encontrados entre as curvas $\rho_{aE}(a)$ e $\rho_{aT}(a)$. A Fig. 5.1, ilustra os resultados encontrados para as curvas de resistividades aparentes experimental e teórica e a Tab. 5.2 dispõem os valores das resistividades e espessuras de cada camada obtidos para esta estratificação.

Tabela 5.1 - Caso 1 - Resistividades aparentes.

a [m]	Resistividade Experimental $[\Omega \cdot m]$	Resistividade Teórica MQ-N $[\Omega \cdot m]$	Diferenças [%]
1, 0	641, 83	660, 43	2, 88
2, 0	996, 62	1023, 29	2, 68
4, 0	1437, 62	1466, 98	2, 06
8, 0	1887, 08	1859, 93	-1, 44
16, 0	2091, 32	2106, 60	0, 73

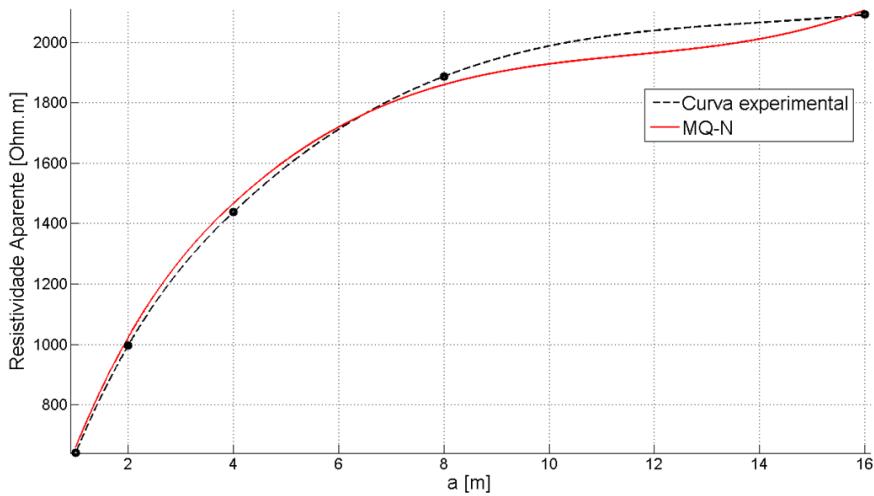


Figura 5.1 - Caso 1 - Curvas de resistividades aparentes.

Tabela 5.2 - Caso 1 - Resultado da estratificação do solo.

Camada (i)	h_i [m]	ρ_i [$\Omega \cdot m$]
1 ^a	0,70	414,01
2 ^a	∞	2257,95

5.1.2 Estudo de Caso 2

Na Tab. 5.3 estão dispostos os valores das resistividades aparentes experimental e teórica para este estudo de caso, assim como os desvios encontrados entre as curvas. Na Fig. 5.2, ilustra-se os resultados encontrados para as curvas de resistividades aparentes experimental e teórica e por fim, a Tab. 5.4 apresenta os valores das resistividades e espessuras de cada camada obtidos para esta estratificação.

Tabela 5.3 - Caso 2 - Resistividades aparentes.

a [m]	Resistividade		Diferenças [%]
	Experimental $[\Omega \cdot m]$	Teórica MQ-N $[\Omega \cdot m]$	
1,0	3582,92	3383,35	-5,57
2,0	3354,57	2324,68	-30,70
4,0	1872,05	1821,69	-2,69
8,0	2104,58	2112,25	-0,36
16,0	2322,47	2226,89	-4,12

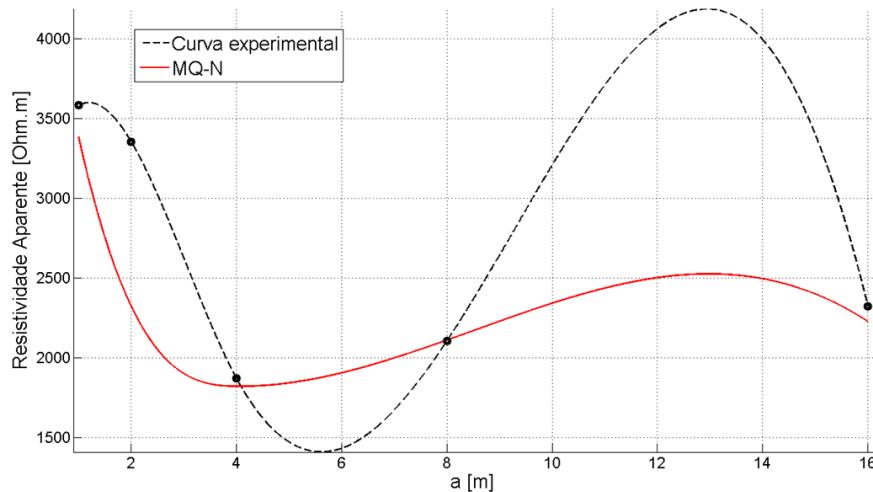


Figura 5.2 - Caso 2 - Curvas de resistividades aparentes.

Tabela 5.4 - Caso 2 - Resultado da estratificação do solo.

Camada (i)	h_i [m]	ρ_i $[\Omega \cdot m]$
1 ^a	1,10	4000,05
2 ^a	2,37	1114,57
3 ^a	2,90	4222,80
4 ^a	∞	2000,00

5.1.3 Estudo de Caso 3

São apresentados na Tab. 5.5 os valores das resistividades aparentes experimental e teórica e as diferenças entre as curvas para este estudo de caso. Na Fig. 5.3, ilustram-

se os resultados encontrados para as curvas de resistividades aparentes experimental e teórica, a Tab. 5.6 apresenta os valores das resistividades e espessuras de cada camada obtidos para esta estratificação.

Tabela 5.5 - Caso 3 - Resistividades aparente.

a [m]	Resistividade Experimental [$\Omega \cdot m$]	Resistividade Teórica MQ-N [$\Omega \cdot m$]	Diferenças [%]
1,0	16841,29	15712,25	-6,70
2,0	20715,20	19948,58	-3,70
4,0	15381,67	15999,22	4,01
8,0	9483,99	8999,18	-5,11
16,0	24970,15	23055,54	-7,67

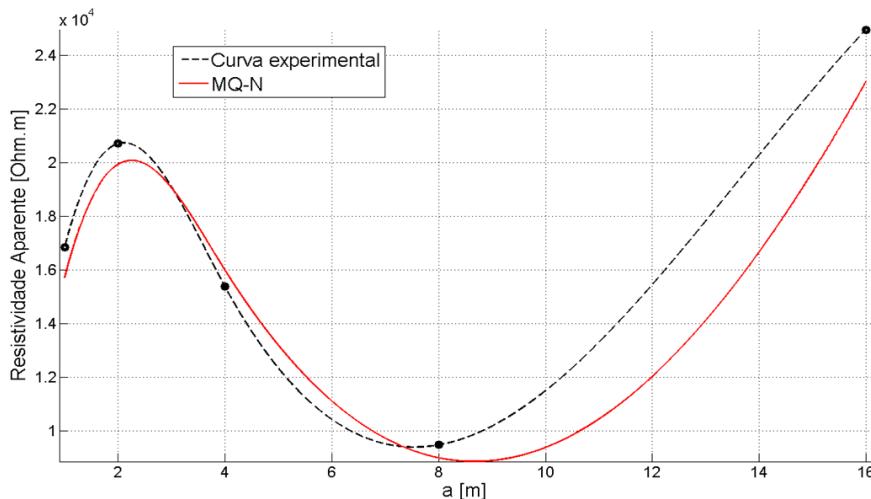


Figura 5.3 - Caso 3 - Curvas de resistividades aparentes.

Tabela 5.6 - Caso 3 - Resultado da estratificação do solo.

Camada (i)	h_i [m]	ρ_i [$\Omega \cdot m$]
1 ^a	1,18	13985,00
2 ^a	0,98	22591,35
3 ^a	∞	13326,85

5.1.4 Estudo de Caso 4

Nesta estratificação, N será fixado em um valor pré-determinado, isto é, N não será otimizado, $N = 2$. Nesta estratificação, o método proposto será comparado com o método das imagens complexas. Nas Tab. 5.7 e Tab. 5.8, apresentam-se os resultados encontrados para as curvas de resistividades aparentes experimental e teóricas utilizando o método de Quase-Newton e o método das Imagens Complexas.

Tabela 5.7 - Caso 4 - Resistividades aparente experimental & teórica MQ-N.

a [m]	Resistividade Experimental [$\Omega \cdot m$]	Resistividade Teórica MQ-N [$\Omega \cdot m$]	Diferenças [%]
2, 0	3389, 00	3389, 17	0, 01
4, 0	1900, 00	1609, 22	-15, 30
8, 0	585, 00	585, 05	0, 01
16, 0	568, 00	574, 55	1, 15
32, 0	823, 00	771, 82	-6, 22

Tabela 5.8 - Caso 4 - Resistividades aparente experimental & teórica MIC.

a [m]	Resistividade Experimental [$\Omega \cdot m$]	Resistividade Teórica MIC [$\Omega \cdot m$]	Diferenças [%]
2, 0	3389, 00	3226, 46	-4, 80
4, 0	1900, 00	2294, 48	20, 76
8, 0	585, 00	1105, 38	88, 95
16, 0	568, 00	690, 07	21, 49
32, 0	823, 00	640, 72	-22, 15

Na Fig. 5.4, estão ilustradas as curvas de resistividades aparentes teóricas e experimental, na Tab. 5.9 são apresentados os resultados desta estratificação pelo método de Quase-Newton e pelo método das Imagens Complexas.

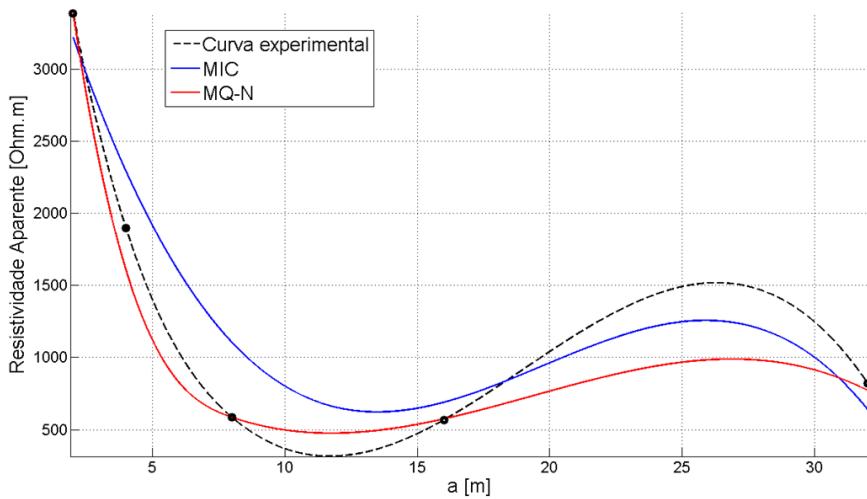


Figura 5.4 - Caso 4 - Curvas de resistividades aparentes.

Tabela 5.9 - Caso 4 - Resultado da estratificação do solo.

Camada (i)	MQ-N	MIC
$\rho_1 [\Omega \cdot m]$	99905, 15	3550, 00
$\rho_2 [\Omega \cdot m]$	570, 77	630, 00
$h_1 [m]$	0, 36	3, 10
$h_2 [m]$	∞	∞

5.1.4.1 Comentário 1

As Seção 5.1.1 e Seção 5.1.3, apresentam uma estratificação onde o método de Quase-Newton não teve dificuldade em encontrar uma solução pretendida (valores de desvios $< 10\%$). No entanto, na Seção 5.1.2 as diferenças ficaram elevados e fora dos percentuais desejados. Já a estratificação da Seção 5.1.4, o método de Quase-Newton teve um desempenho melhor que o método das Imagens Complexas, no entanto, os valores das diferenças ainda comprometem a estratificação realizada.

Vários casos foram processados utilizando o método de Quase-Newton e em todos os casos que esta metodologia foi utilizada, os resultados encontrados apresentaram desvios menores ou iguais aos encontrados utilizando o método das Imagens Complexas. Isto pode ser observado nos valores apresentados nas Tab. 5.7 e Tab. 5.8, onde nestes estudos de casos, os valores das diferenças encontrados pelo método de

Quase-Newton são melhores em relação ao método das Imagens Complexas.

De fato, o que ocorre é que os métodos de estratificação tradicionais determinam a resistividade da primeira camada pela extrapolação da curva experimental $\rho_{aE}(a)$ até $a = 0$ (CALIXTO et al., 2010b; CALIXTO et al., 2010a). Sabendo que um método de extrapolação é puramente matemático, quando a curva $\rho_{aE}(a)$ não tem um bom comportamento, algo que ocorre com freqüência, os resultados obtidos podem atingir erros que ultrapassam valores aceitáveis na prática (compare as diferenças nas Tab. 5.7 e Tab. 5.8). Um erro elevado para um determinado valor de ρ_1 pode invalidar toda a estratificação. Mesmo um erro aceitável em ρ_1 pode se propagar por toda a estratificação, tornando a sua precisão não confiável. Na metodologia proposta, ρ_1 é obtido a partir das expressões (3.19) e (3.20), tendo um significado físico.

A consideração de N fixo (problema da Seção 5.1.4) também é comum nos métodos de estratificação tradicionais. No entanto, a estratificação do solo envolve três incógnitas: o número de camadas, resistividade e espessura de cada camada. Portanto, o número de camadas não é uma dado do problema e sim um parâmetro a ser otimizado (o problema da Seção 5.1.4 será resolvido na Seção 5.2.5 onde N também será otimizado). Um erro médio total (média aritmética das diferenças) de cerca de 10% é perfeitamente aceitável, pois, nos projetos de malha de aterramentos, as imperfeições na construção da malha justificam esta ordem de magnitude do erro.

A justificativa dos erros que não são provenientes do fator numérico computacional, é que alguns solos comportam-se de maneira diferente ao de camadas horizontais homogêneas. Isto explica porque às vezes o erro acumulado na estratificação não se deve apenas ao processo numérico do ajuste da curva. Uma parcela desse erro, por vezes, uma das principais, pode ser causado pelo fato de que o solo não tem uniformidade nas suas camadas horizontais.

Restrições sobre a modelagem proposta pode aparecer com a existência de uma fenda vertical ou oblíqua na camada, isto é suficiente para interferir nos resultados do método de Wenner. Nessa situação, um processo de estratificação preciso é importante. Se for certo que o erro cometido no ajuste da curva é pequeno, mas o erro ainda é verificado nos valores obtidos da estratificação, deduz-se que o modelo de estratificação do solo feito por camadas horizontais, não é aplicável a este tipo de solo (CALIXTO et al., 2010b).

Assim, os valores dos erros que ainda resulta, motiva estudos complementares para a obtenção de erros menores na estratificação do solo, o que justifica, por exemplo, um estudo mais apropriado no processo de otimização. Portanto, utilizando o método de estratificação proposto em conjunto com o processo de otimização de Quase-Newton, observa-se um erro médio de 82,7% menor em relação ao erro máximo cometido pelo método das Imagens Complexas (veja como exemplo o estudo de caso da Seção 5.1.4), enquanto a incidência maior de erro fica em torno de 12,0% e apesar de ter obtido erros inferiores a do método das Imagens Complexas, existe a necessidade de diminuir ainda mais os erros. Em uma primeira análise pode-se partir da hipótese que a incidência maior de erro está no método de otimização utilizado. Com isto, na tentativa de diminuir (minimizar) ainda mais as diferenças, será utilizado um método heurístico na tentativa de diminuir ainda mais os erros incidentes.

5.2 Aplicação do Algoritmo Genético

Nesta Seção apresenta-se primeiramente o desempenho do AGCR proposto na Seção 4.5. Posteriormente, as estratificações realizadas na Seção anterior (Seção 5.1) utilizando o método de Quase-Newton, serão repetidas empregando-se desta vez o AGCR.

Todos os resultados obtidos pelo AGCR na solução dos problemas de estratificação, tiveram os seguintes parâmetros definidos: tamanho do torneio $\tau = 4$, taxa de mutação $1\% \leq P_m \leq 40\%$, taxa de cruzamento $80\% \geq P_r \geq 30\%$, número máximo de geração $g_{max} = 100$, número de indivíduo na população $m = 20$, número de parâmetros a serem otimizados $n = (2 \cdot N) - 1$, a execução do OED de 10 em 10 gerações com $\varphi = 0,95$ e o valor de $\Delta(g, y)$ será descrito na Seção 5.2.1.

5.2.1 Desempenho do AGCR

Lembrando que $\Delta(g, y)$ dado por (4.16) é o valor de perturbação no gene, ou seja, o incremento somado ou subtraído do valor do gene, tem-se nas Fig. 5.5 e Fig. 5.6 gráficos contendo valores de $\Delta(g, y)$ relativos a um mesmo processo de otimização de uma estratificação. Como o AGCR trabalha com duas populações de indivíduos (Seção 4.5) e y em $\Delta(g, y)$ define a faixa de variação da perturbação do gene $]0, y]$, portanto, cada população terá uma faixa onde os valores mínimos e máximos dependerá da ordem de grandeza assumida pelos indivíduos da população, ou seja, um y_r para a população das resistividade e um y_e para a população das espessuras.

Assim sendo, para valores máximos de y_r e y_e , na Fig. 5.5 tem-se $y_r = 189,60 [\Omega \cdot m]$ e $y_e = 0,071 [m]$, na Fig. 5.6 tem-se $y_r = 23,32 [\Omega \cdot m]$ e $y_e = 0,012 [m]$. Observe que y_r da Fig. 5.5 é aproximadamente 8,2 vezes maior que o valor máximo de y_r da Fig. 5.5. Para este processo de otimização, os valores dos genes referente as resistividades, isto é, y_r é da ordem de $3000 [\Omega \cdot m]$ e y_e da ordem de $4,5 [m]$, justificando assim um teste com valores acrescidos de aproximadamente 8,2 vezes. Nestes gráficos, os valores de $\Delta(g, y_r)$ da resistividade (azul) estão divididos por 10^3 .

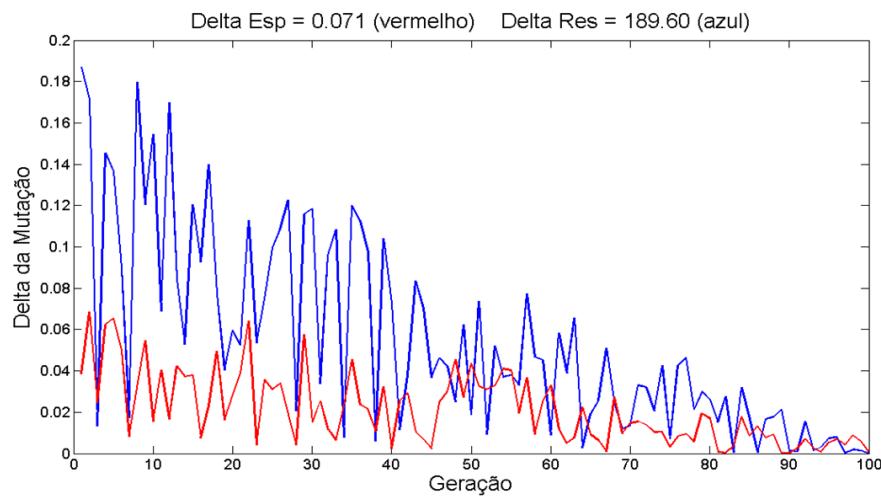


Figura 5.5 - $\Delta(g, y)$ da mutação, espessura (vermelho) e resistividade (azul).

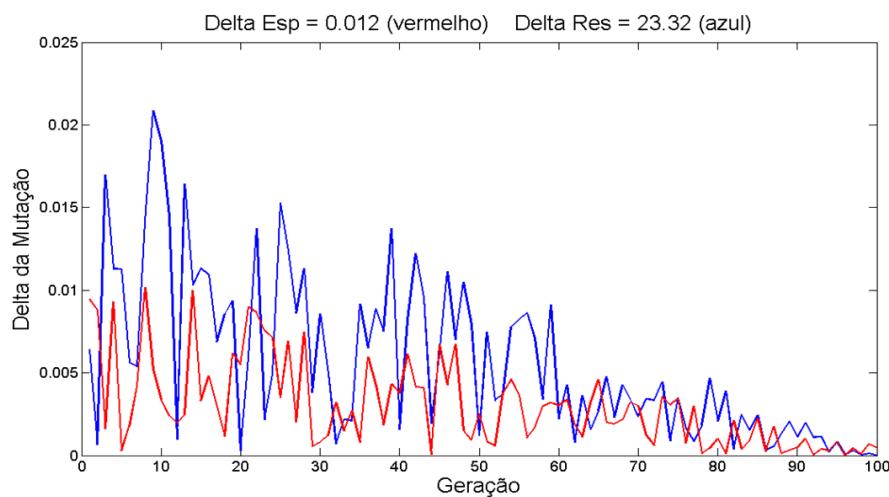


Figura 5.6 - $\Delta(g, y) \approx 8,2$ vezes menor com relação ao da Fig. 5.5.

As Fig. 5.7 e Fig. 5.8 ilustram o processo de otimização promovido pelo AGCR. Observe que no topo destes gráficos aparecem o valor de $f(x^*)$. Estes gráficos apresentam os valores da função de avaliação $f(\underline{x})$ pelo número de geração g , ou seja, estes são gráficos de desempenho do AGCR. Tem-se na Fig. 5.7, o gráfico do processo de otimização relativo aos $\Delta(g, y)$ da Fig. 5.5 e na Fig. 5.8, o gráfico do processo de otimização relativo aos da Fig. 5.6.

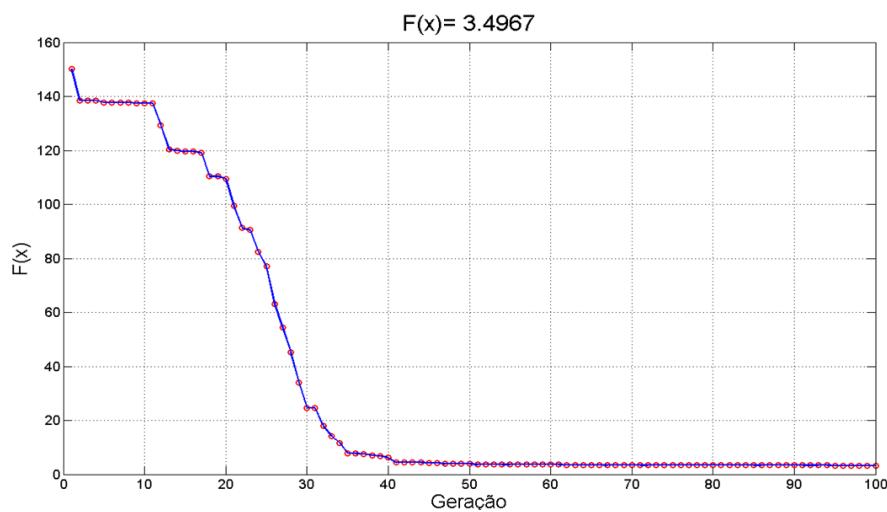


Figura 5.7 - Desempenho do AGCR com $\Delta(g, y)$ da Fig. 5.5.

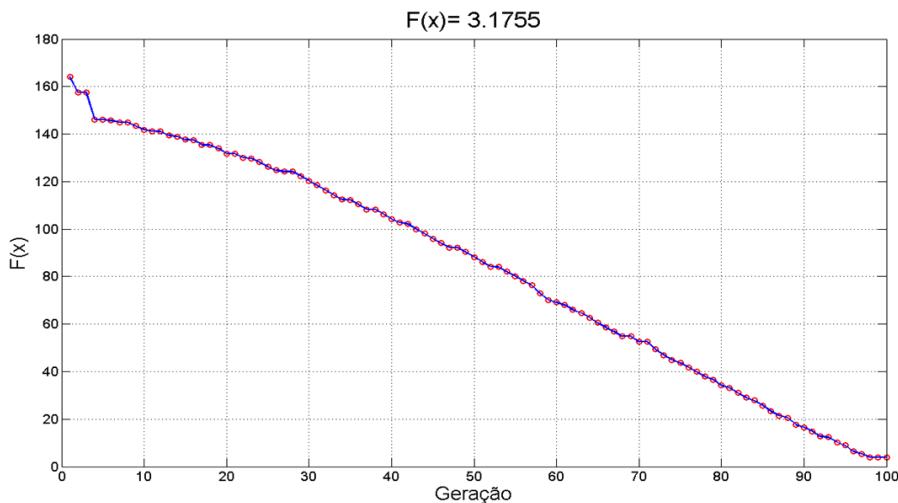


Figura 5.8 - Desempenho do AGCR com $\Delta(g, y)$ da Fig. 5.6.

Observa-se que na Fig. 5.7 o processo de otimização atinge um valor otimizado aproximadamente na geração $g = 43$, enquanto no processo de otimização da Fig. 5.8, o valor otimizado é atingindo aproximadamente na geração $g = 95$. No entanto, no processo de otimização da Fig. 5.8 quase não ocorreu o fenômeno de estagnação e o valor de $f(x^*)$ é menor.

As Fig. 5.9 e Fig. 5.10 ilustram a diversidade da população do AGCR nos processos de otimização das Fig. 5.7 e Fig. 5.8, respectivamente. A diversidade da população do AGCR, D_{iv} , indica o quanto distantes estão os valores da função de avaliação de cada indivíduo $f(x_i)$ com relação ao da função de avaliação do melhor indivíduo até então avaliado $F(l_m)$, (4.18), isto indica qual é a capacidade do AGCR de explorar o espaço de busca e é dado pela expressão:

$$D_{iv} = \left[\sum_{i=1}^m f(x_i) \cdot m^{-1} \right] \cdot [F(l_m)]^{-1} \quad (5.1)$$

Observa-se nas Fig. 5.9 e Fig. 5.10 que ao aumentar a faixa de valores de y_r e y_e , consequentemente aumenta o valor de D_{iv} . No entanto, estes aumentos nos valores de y_r e y_e provocam a estagnação do processo de otimização. Observa-se na expressão (5.1) que quando $D_{iv} \rightarrow 1$ todos os indivíduos têm suas funções de avaliação $f(x_i) \rightarrow F(l_m)$.

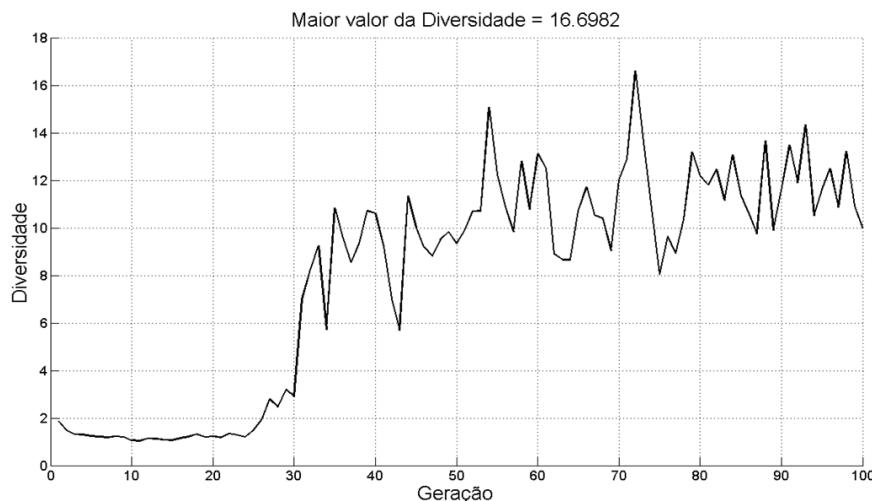


Figura 5.9 - Diversidade da população da Fig. 5.7.



Figura 5.10 - Diversidade da população da Fig. 5.8.

Esta análise mostra que existem alguns parâmetros do AGCR que devem ser ajustados de acordo com o problema a ser resolvido. Neste trabalho foi utilizado um valor máximo para $y_r = 50$ [$\Omega \cdot m$] e um valor máximo para $y_e = 3$ [m].

5.2.2 Estudo de Caso 5

Neste estudo de caso os valores das resistividades aparentes experimental e teórica para ambos os métodos (AGCR e MQ-N) encontram-se nas Tab. 5.10 e Tab. 5.11. Na Fig. 5.11 são apresentadas as curvas de resistividades aparentes experimental e teóricas $\rho_{aE}(a)$ e $\rho_{aT}(a)$, respectivamente. E por fim, na Tab. 5.12 são apresentados os resultados desta estratificação. Os valores da resistividade aparente experimental desta estratificação são análogos aos da Seção 5.1.1.

Tabela 5.10 - Caso 5 - Resistividades aparente experimental & teórica MQ-N.

a [m]	Resistividade Experimental $[\Omega \cdot m]$	Resistividade Teórica MQ-N $[\Omega \cdot m]$	Diferenças [%]
1,0	641,83	660,43	2,88
2,0	996,62	1023,29	2,68
4,0	1437,62	1466,98	2,06
8,0	1887,08	1859,93	-1,44
16,0	2091,32	2106,60	0,73

Tabela 5.11 - Caso 5 - Resistividades aparente experimental & teórica AGCR.

a [m]	Resistividade Experimental $[\Omega \cdot m]$	Resistividade Teórica AGCR $[\Omega \cdot m]$	Diferenças [%]
1,0	641,83	653,43	1,81
2,0	996,62	1014,29	1,77
4,0	1437,62	1456,71	1,33
8,0	1887,08	1870,20	-0,89
16,0	2091,32	2098,57	0,35

Tabela 5.12 - Caso 5 - Resultado da estratificação do solo.

Camada (i)	MQ-N	AGCR
ρ_1 $[\Omega \cdot m]$	414,01	408,99
ρ_2 $[\Omega \cdot m]$	2257,95	2264,00
h_1 [m]	0,70	0,72
h_2 [m]	∞	∞

5.2.3 Estudo de Caso 6

Os valores das resistividades aparentes experimentais desta estratificação são semelhantes aos da Seção 5.1.2. Para este estudo de caso os valores das resistividades aparentes experimental e teórica encontram-se nas Tab. 5.13 e Tab. 5.14. Na Fig. 5.12

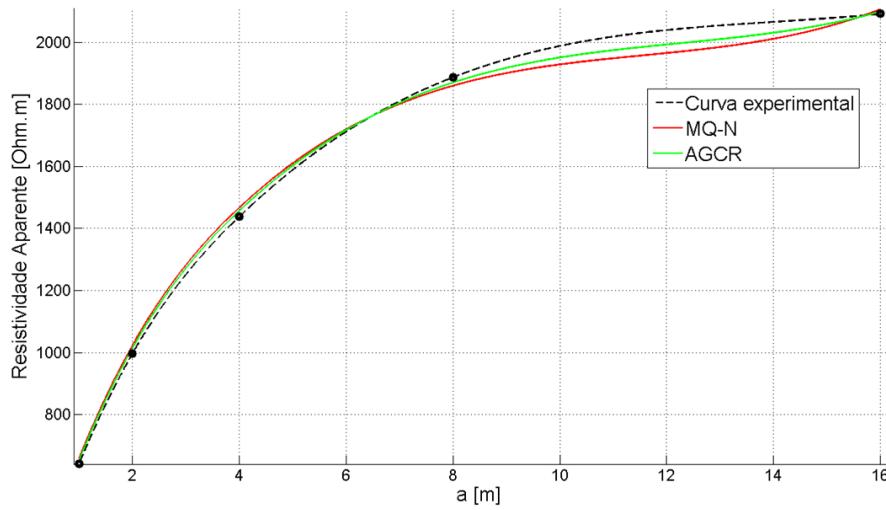


Figura 5.11 - Caso 5 - Curvas de resistividades aparentes.

é apresentada a comparação entre as curvas de resistividades aparentes experimental e teóricas $\rho_{aE}(a)$ e $\rho_{aT}(a)$, respectivamente. E por fim, na Tab. 5.15 são apresentados os resultados para esta estratificação.

Tabela 5.13 - Caso 6 - Resistividades aparente experimental & teórica MQ-N.

a [m]	Resistividade Experimental $[\Omega \cdot m]$	Resistividade Teórica MQ-N $[\Omega \cdot m]$	Diferenças [%]
1,0	3582,92	3383,35	-5,57
2,0	3354,57	2324,68	-30,70
4,0	1872,05	1821,69	-2,69
8,0	2104,58	2112,25	-0,36
16,0	2322,47	2226,89	-4,12

Tabela 5.14 - Caso 6 - Resistividades aparente experimental & teórica AGCR.

a [m]	Resistividade		Diferenças [%]
	Experimental [$\Omega \cdot m$]	Resistividade Teórica AGCR [$\Omega \cdot m$]	
1, 0	3582, 92	3663, 81	2, 26
2, 0	3354, 57	3258, 08	-20, 76
4, 0	1872, 05	1927, 73	2, 97
8, 0	2104, 58	2106, 74	0, 10
16, 0	2322, 47	2210, 28	-4, 83

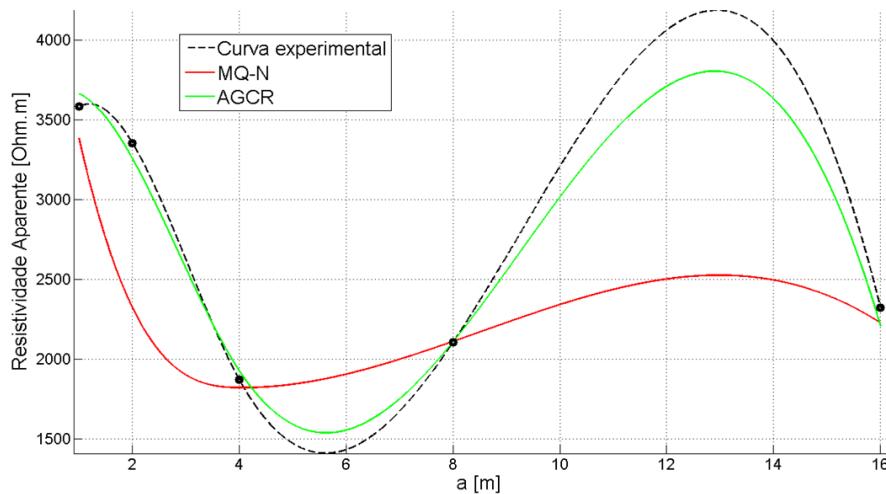


Figura 5.12 - Caso 6 - Curvas de resistividades aparentes.

5.2.4 Estudo de Caso 7

Os valores das resistividades aparentes experimentais e teórica para este estudo encontram-se nas Tab. 5.16 e Tab. 5.17. Na Tab. 5.18 são apresentados os resultados desta estratificação. Na Fig. 5.13 é feita uma comparação entre as curvas de resistividades aparentes experimentais e teóricas. Os valores das resistividades aparentes experimentais desta estratificação são análogos aos apresentados na Seção 5.1.3.

Tabela 5.15 - Caso 6 - Resultado da estratificação do solo.

Camada (i)	MQ-N	AGCR
$\rho_1 [\Omega \cdot m]$	4000,05	4120,35
$\rho_2 [\Omega \cdot m]$	1114,57	1089,34
$\rho_3 [\Omega \cdot m]$	4222,80	4220,83
$\rho_4 [\Omega \cdot m]$	2000,00	2007,31
$h_1 [m]$	1,10	1,31
$h_2 [m]$	2,37	2,21
$h_3 [m]$	2,90	2,75
$h_4 [m]$	∞	∞

Tabela 5.16 - Caso 7 - Resistividades aparente experimental & teórica MQ-N.

a [m]	Resistividade Experimental $[\Omega \cdot m]$	Resistividade Teórica MQ-N $[\Omega \cdot m]$	Diferenças [%]
1,0	16841,29	15712,25	-6,70
2,0	20715,20	19948,58	-3,70
4,0	15381,67	15999,22	4,01
8,0	9483,99	8999,18	-5,11
16,0	24970,15	23055,54	-7,67

Tabela 5.17 - Caso 7 - Resistividades aparente experimental & teórica AGCR.

a [m]	Resistividade Experimental $[\Omega \cdot m]$	Resistividade Teórica AGCR $[\Omega \cdot m]$	Diferenças [%]
1,0	16841,29	16120,21	-4,28
2,0	20715,20	19966,26	-3,61
4,0	15381,67	15422,58	0,27
8,0	9483,99	8999,18	-5,11
16,0	24970,15	23716,15	-5,02

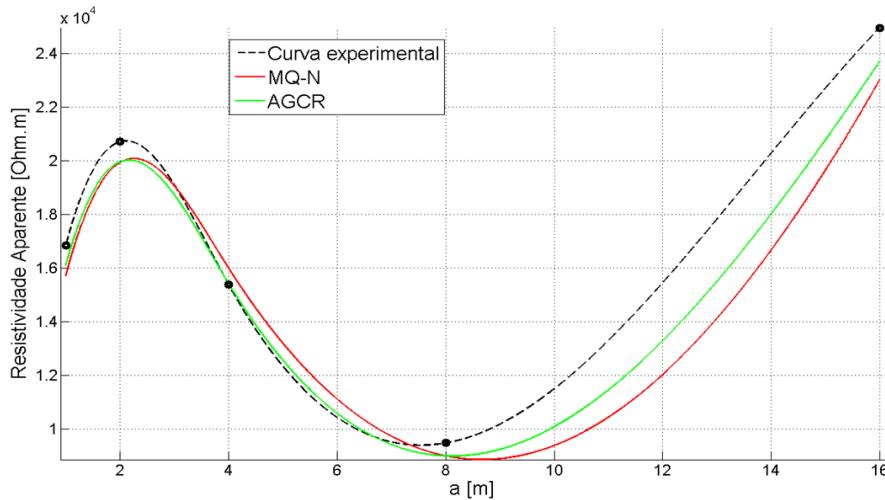


Figura 5.13 - Caso 7 - Curvas de resistividades aparentes.

Tabela 5.18 - Caso 7 - Resultado da estratificação do solo.

Camada (i)	MQ-N	AGCR
$\rho_1 [\Omega \cdot m]$	13985,00	14315,09
$\rho_2 [\Omega \cdot m]$	22591,35	21814,81
$\rho_3 [\Omega \cdot m]$	13326,85	13535,38
$h_1 [m]$	1,18	1,06
$h_2 [m]$	0,98	0,78
$h_3 [m]$	∞	∞

5.2.5 Estudo de Caso 8

Os valores das resistividades aparentes experimentais desta estratificação são idênticos aos da Seção 5.1.4. Para esta estratificação, além de comparar os resultados com todos os métodos descritos anteriormente (MIC, MQ-N e AGCR), é feita uma análise para o caso do número de camadas N não ser otimizado, fixado com $N = 2$. Os valores experimentais da resistividade aparente são listados na Tab. 5.19. Esta estratificação foi retirada da norma brasileira de regulamentação ([NBR 7117, 1981](#)), onde a norma especifica uma estratificação em duas camadas, (compare as Fig. 5.14 para $N = 2$ e Fig. 5.15 para $N = 3$).

Na Fig. 5.14 são plotadas as curvas de resistividades experimental e teórica obtida

Tabela 5.19 - Caso 8 - Resistividade experimental.

a [m]	Resistividade Experimental [$\Omega \cdot m$]
2,0	3389,00
4,0	1900,00
8,0	585,00
16,0	568,00
32,0	823,00

por cada método. Na Tab. 5.20 são apresentadas as curvas de resistividades teóricas e na Tab. 5.21 são dispostos os desvios produzido por cada metodologia. Na Tab. 5.22, são dispostos os resultados desta estratificação com N fixo, pode-se examinar uma variação dos valores encontrados para as diferenças entre as metodologias e observar-se que em todos os valores correspondentes a a [2, 4, 8, 16, 32], os desvios encontrado pelo AGCR são menores. Finalmente, a Tab. 5.23 mostra as diferenças e a Tab. 5.24 apresenta os resultados da estratificação feita pelo algoritmo genético proposto sem fixar o número N de camada (N otimizado). A Fig. 5.15, ilustra este processo de estratificação do solo com N otimizado, resultando em uma estratificação em três camadas de solo (compare Tab. 5.21, 1^a coluna com a Tab. 5.23, 3^a coluna).

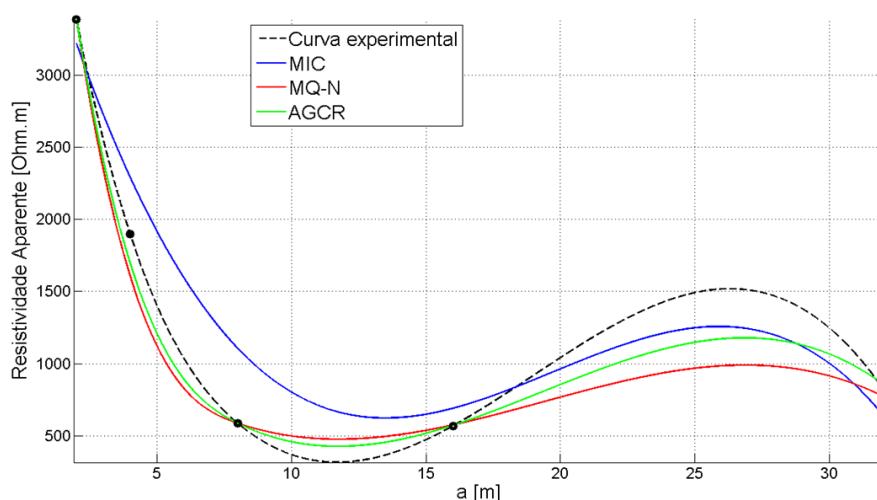


Figura 5.14 - Caso 8 - Curvas de resistividades aparentes.

Tabela 5.20 - Caso 8 - Resistividades teóricas.

AGCR [$\Omega \cdot m$]	MQ-N [$\Omega \cdot m$]	MIC [$\Omega \cdot m$]
3390,04	3389,17	3226,46
1698,88	1609,22	2294,48
585,07	585,05	1105,38
572,09	574,55	690,07
855,47	771,82	640,72

Tabela 5.21 - Caso 8 - Valores das diferenças.

AGCR [%]	MQ-N [%]	MIC [%]
0,03069	0,00502	-4,79551
-10,58526	-15,30421	20,76211
0,01197	0,00855	88,95385
0,72007	1,15317	21,49120
3,94532	-6,21871	-22,14824

Tabela 5.22 - Caso 8 - Resultados dos parâmetros da estratificação com $N = 2$.

Camada (i)	AGCR	MQ-N	MIC
ρ_1 [$\Omega \cdot m$]	9109,74	99905,15	3550,00
ρ_2 [$\Omega \cdot m$]	551,07	570,77	630,00
h_1 [m]	0,74	0,36	3,10
h_2 [m]	∞	∞	∞

Tabela 5.23 - Caso 8 - Resistividades & desvios para N otimizado.

Resistividade Experimental [$\Omega \cdot m$]	Resistividade Teórica AGCR [$\Omega \cdot m$]	Desvio [%]
3389,00	3389,61	-0,0180
1900,00	1953,06	-2,7926
585,00	611,44	-4,5196
568,00	561,88	1,0774
823,00	823,05	-0,0060

Tabela 5.24 - Caso 8 - Resultado com N otimizado.

Camada (i)	AGCR
ρ_1 [$\Omega \cdot m$]	8893,10
ρ_2 [$\Omega \cdot m$]	452,61
ρ_3 [$\Omega \cdot m$]	16520,74
h_1 [m]	0,76
h_2 [m]	8,47
h_3 [m]	∞

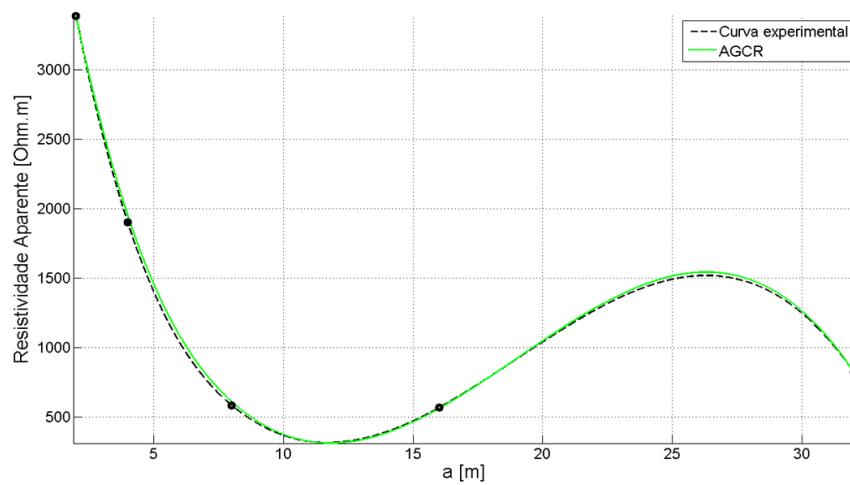


Figura 5.15 - Caso 8 - Curvas de resistividades com N otimizado.

5.2.5.1 Comentário 2

A estratificação apresentada na Seção 5.2.2 é análoga à apresentada na Seção 5.1.1, e apesar de o método de Quase-Newton já ter encontrado valores esperados, o algoritmo genético conseguiu encontrar desvios ainda menores (compare Tab. 5.10 com Tab. 5.11, 4^a coluna). A estratificação da Seção 5.1.2, onde os desvios encontrados utilizando o método de Quase-Newton ficaram elevados, utilizando o algoritmo genético teve uma redução de 28,82%, porém ainda permanecendo desvios > 10%. Já a estratificação da Seção 5.2.4, que é idêntica a estratificação da Seção 5.1.3, teve uma redução de 32,73% nos valores das diferenças em relação aos dois métodos (MQ-N e AGCR, compare Tab. 5.16 com Tab. 5.17, 4^a coluna).

Vários casos foram simulados e em todos os casos, contando com os aqui expostos, o algoritmo genético obteve um menor desvio. Com relação a otimização do número de camada N , tem-se que a melhor estimativa para este número, sem levar em conta um processo de otimização, consiste no cálculo do número de inflexões p_f da curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$, onde toma-se $N = p_f + 1$. Uma boa demonstração deste fato, porém, não exclui a necessidade da otimização de N , pode ser observado na Seção 5.2.5, onde a norma (NBR 7117, 1981) solicita que seja imposta uma estratificação com $N = 2$ camadas.

Na Seção 5.2.5, analisando a curva de resistividade experimental da Fig. 5.14, é possível observar dois pontos de inflexão, provocando uma estratificação com $N = 3$ camadas. O desenvolvimento de uma estratificação com $N = 3$ camadas resultou em uma estratificação onde os valores das diferenças são reduzidos consideravelmente (compare Fig. 5.14 com a Fig. 5.15) levando a um decréscimo de 44,9% (para o melhor caso de $N = 2$) no valor do erro médio total utilizando o algoritmo genético.

Agora, analisando os resultados contidos na Seção 5.2 em seus pormenores, deduz-se que os valores obtidos para as diferenças entre as curvas de resistividade aparente experimental e teórica são satisfatórios. Esta metodologia apresenta resultados que são, até certa forma, adequados para a estratificação horizontal do solo em várias camadas.

Caso haja, utilizando esta metodologia, resultados que não seja coerente com o significado físico ou onde as diferenças não decresçam, pode-se concluir com certa segurança que o solo não se adéqua ao modelo de solo, supostamente, em camadas

horizontais, ou de outra forma, pode existir no local da estratificação um fenda oblíqua, uma imensa rocha, algum materiais extremamente alcalinos ou até mesmo um material condutor enterrado que possa de alguma maneira mudar o comportamento do solo e, portanto, seus valores de resistividade (CALIXTO et al., 2010b).

5.3 Aplicações & Comparações de Resultados

São apresentadas nesta seção oito estratificações do solo onde nas duas primeiras são obtidas as condutividades elétricas do solo σ_i e suas respectivas espessuras h_i . Nestes dois casos a curva obtida em campo é a curva de condutividade aparente experimental dada por (2.7). A condutividade elétrica da primeira camada σ_1 é então comparada com métodos tradicionais utilizados na Agricultura de Precisão. A terceira estratificação é realizada em uma área onde os métodos das Imagens Complexas (MIC) e o método de Quase-Newton (MQ-N) tiveram dificuldades em obter resultados satisfatórios. Os outros cinco estudos foram retirados de trabalhos publicados em revistas especializadas.

Portanto, primeiramente apresentam-se os resultados das análises das duas áreas distintas (Seção 5.3.1 e Seção 5.3.2), onde os dados utilizados foram coletados utilizando os procedimentos expostos na Seção 4.1. As áreas experimentais possuem um hectare cada, e a idéia é a aplicação na Agricultura de Precisão, haja vista, os métodos tradicionais de obtenção da condutividade elétrica do solo utilizado neste campo do conhecimento, somente mensura a condutividade aparente em uma faixa do solo de até 0,9 m, considerando esta faixa como uma massa uniforme. Estes métodos não conseguem calcular a condutividade de cada camada do solo.

Os resultados encontrados com a metodologia proposta para a condutividade da primeira camada são comparados com o método direto de mensurar a condutividade elétrica do solo (Condutivímetro *glos.*), amplamente utilizados na Agricultura de Precisão (LÜCK; EISENREICH, 2001) e com a pasta de saturação (análise laboratorial) (SLAVICH; PETTERSON, 1993).

5.3.1 Estudo de Caso 9

Na Tab. 5.25 estão dispostos os valores encontrados para a condutividade aparente, teórica e experimental desta estratificação, as curvas para este estudo de caso são apresentadas na Fig. 5.16. Na Tab. 5.26 são apresentados os valores da condutividade elétrica da primeira camada do solo para cada método e na Tab. 5.27 o resultado

para todas as camadas desta estratificação.

Tabela 5.25 - Caso 9 - Condutividades experimental & teórica com desvios.

a [m]	Condutividade Experimental [$mS \cdot m^{-1}$]	Condutividade Teórica AGCR [$mS \cdot m^{-1}$]	Desvio [%]
1,0	0,7469	0,7469	0,0007
2,0	0,7348	0,7331	-0,2243
4,0	0,6790	0,6953	2,3983
8,0	0,7686	0,7686	0,0000
16,0	0,9268	0,9268	0,0000

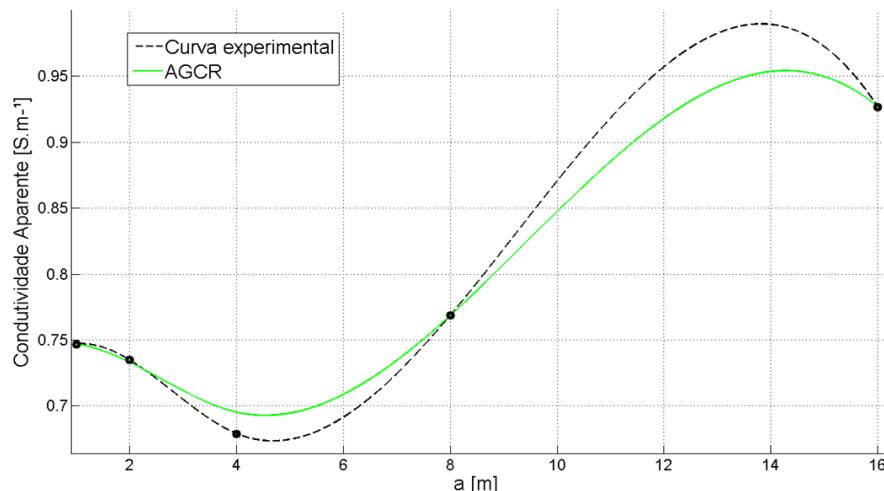


Figura 5.16 - Caso 9 - Curvas de condutividades aparentes.

Tabela 5.26 - Caso 9 - Comparaçāo do valor de σ_1 .

Método Proposto AGCR σ_1 [$mS \cdot m^{-1}$]	Método Geoelétrico σ_1 [$mS \cdot m^{-1}$]	Pasta de Saturação σ_1 [$mS \cdot m^{-1}$]
0,8083	0,7889	1,0158

Tabela 5.27 - Caso 9 - Resultado da estratificação do solo.

Camada (i)	h_i [m]	σ_i [$mS \cdot m^{-1}$]
1 ^a	0,55	0,8083
2 ^a	3,03	0,6705
3 ^a	7,66	1,5933
4 ^a	∞	0,5419

5.3.2 Estudo de Caso 10

Na Tab. 5.28 são dispostos os valores encontrados para a condutividade aparente, teórica e experimental desta estratificação, as curvas para este estudo de caso estão apresentadas na Fig 5.17. Na Tab. 5.29 são apresentados os valores da condutividade elétrica da primeira camada do solo para cada método e na Tab. 5.30 os resultados da estratificação.

Tabela 5.28 - Caso 10 - Condutividades experimental & teórica com desvios.

a [m]	Condutividade Experimental [$mS \cdot m^{-1}$]	Condutividade Teórica AGCR [$mS \cdot m^{-1}$]	Desvio [%]
1,0	0,0953	0,0930	-2,4408
2,0	0,0927	0,1029	11,0067
4,0	0,1233	0,1234	0,0254
8,0	0,0884	0,0884	0,0000
16,0	0,0830	0,0830	0,0000

Tabela 5.29 - Caso 10 - Comparaçāo do valor de σ_1 .

Méthodo Proposto AGCR σ_1 [$mS \cdot m^{-1}$]	Méthodo Geoelétrico σ_1 [$mS \cdot m^{-1}$]	Pasta de Saturação σ_1 [$mS \cdot m^{-1}$]
0,1003	0,1091	0,5089

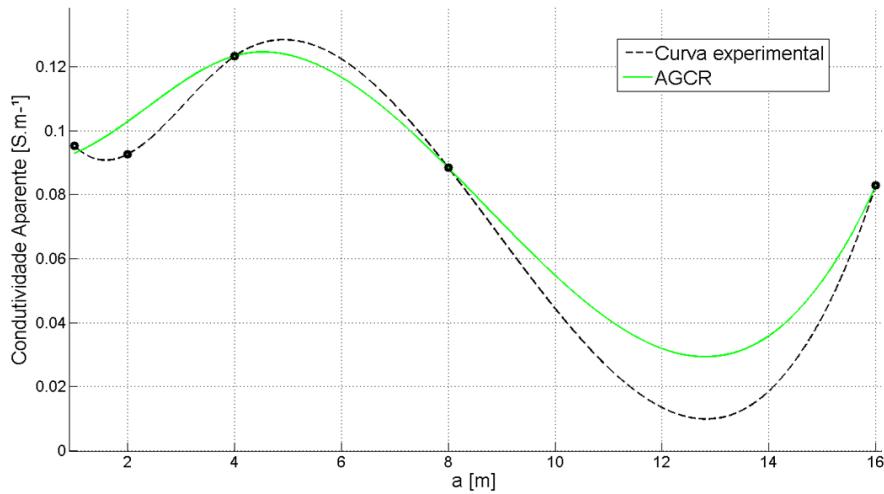


Figura 5.17 - Caso 10 - Curvas de condutividades aparentes.

Tabela 5.30 - Caso 10 - Resultado da estratificação do solo.

Camada (i)	h_i [m]	σ_i [$mS \cdot m^{-1}$]
1 ^a	1,29	0,1003
2 ^a	1,17	0,1031
3 ^a	1,03	0,0461
4 ^a	∞	0,0630

5.3.3 Estudo de Caso 11

Apresenta-se agora, os resultados obtidos para uma estratificação horizontal do solo onde alguns dos métodos anteriormente explorados tiveram dificuldade em encontrar desvios satisfatórios. Para esta estratificação as resistividades experimentais e as distâncias entre os eletrodos estão apresentadas na Tab. 5.31. As curvas com os valores das resistividades teóricas para cada método foram plotadas na Fig. 5.18, e os valores obtidos das resistividades teóricas pode ser analisados na Tab. 5.32.

Na Tab. 5.33, são listados os valores das diferenças entre a curva experimental e as curvas teóricas de resistividades aparentes. Na Tab. 5.34 são apresentados os resultados de cada método de estratificação horizontal do solo utilizados nesta estratificação.

Tabela 5.31 - Caso 11 - Resistividade aparente experimental.

a [m]	Resistividade Experimental [$\Omega \cdot m$]
1,0	10484,43
2,0	10786,84
4,0	8104,34
8,0	11308,53
16,0	12036,63

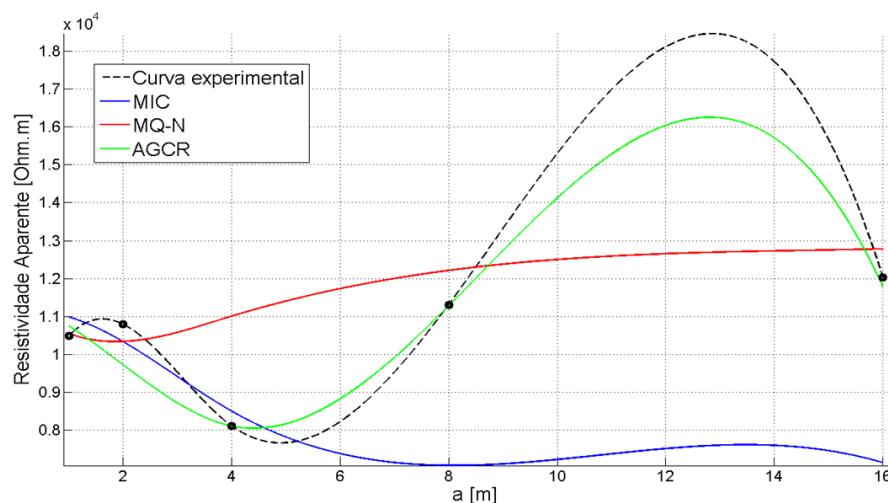


Figura 5.18 - Caso 11 - Curvas de resistividades aparentes.

Tabela 5.32 - Caso 11 - Valores das resistividades aparentes teóricas.

AGCR [$\Omega \cdot m$]	MQ-N [$\Omega \cdot m$]	MIC [$\Omega \cdot m$]
10746,74	10543,07	10983,89
9717,28	10338,11	10328,65
8102,28	11008,84	8493,92
11277,01	12213,21	7064,79
11786,48	12779,38	7137,00

Tabela 5.33 - Caso 11 - Diferenças entre as curvas experimental & teóricas.

AGCR [%]	MQ-N [%]	MIC [%]
2, 50190	0, 55931	4, 76383
-9, 91542	-4, 15998	-4, 24768
-0, 02542	35, 83882	4, 80705
-0, 27871	7, 99998	-37, 52689
-2, 07824	6, 17075	-40, 70599

Tabela 5.34 - Caso 11 - Resultados da estratificação do solo.

Camada (i)	AGCR	MQ-N	MIC
$\rho_1 [\Omega \cdot m]$	9964, 37	10797, 75	11120, 75
$\rho_2 [\Omega \cdot m]$	9693, 47	9150, 76	1496, 70
$\rho_3 [\Omega \cdot m]$	21658, 56	20914, 04	9360, 72
$\rho_4 [\Omega \cdot m]$	15862, 48	12933, 96	7463, 97
$h_1 [m]$	1, 29	1, 00	2, 95
$h_2 [m]$	1, 17	2, 06	3, 50
$h_3 [m]$	1, 03	0, 79	4, 10
$h_4 [m]$	∞	∞	∞

5.3.4 Estudo de Caso 12

Da Seção 5.3.4 até a Seção 5.3.8 são realizados cinco estudos de casos onde os dados foram retirados de trabalho conceituados e publicados em revistas especializadas. Estes trabalhos utilizaram outros cinco diferentes métodos de otimização para encontrar o melhor resultado das estratificações. O número N de camadas foi fixo conforme os resultados contidos em cada trabalho. Em alguns destes trabalhos estavam dispostas as curvas de resistividades aparentes teóricas $\rho_{aT}(a)$. Nos trabalhos onde as curvas de resistividades aparentes teóricas $\rho_{aT}(a)$ não estavam dispostas, foi utilizado o algoritmo de Sunde (que obtém $\rho_{aT}(a)$ através dos resultados) para obter esta curva, assim todos os resultados utilizam a mesma função de avaliação $f(\underline{x})$.

Nesta estratificação, é feita uma comparação entre os resultados obtidos pelo algo-

ritmo genético proposto AGCR (CALIXTO et al., 2010a), e os resultados apresentados em (GONOS; STATHOPULOS, 2005) onde os autores utilizam um *Classical Binary Genetic Algorithm* (CBGA). Os valores experimentais da resistividade aparente são listados na Tab. 5.35.

Tabela 5.35 - Caso 12 - Resistividade aparente experimental.

a [m]	Resistividade Experimental [$\Omega \cdot m$]
1, 0	138, 00
3, 0	79, 00
6, 0	71, 00
8, 0	67, 00
10, 0	80, 00
15, 0	88, 00
20, 0	99, 00
40, 0	151, 00
60, 0	170, 00

Na Fig. 5.19 são plotadas as curvas de resistividades experimental e teórica obtida por cada método. Na Tab. 5.36 são apresentadas as curvas de resistividades teóricas dos dois métodos e na Tab. 5.37 são dispostos os desvios produzido por cada metodologia.

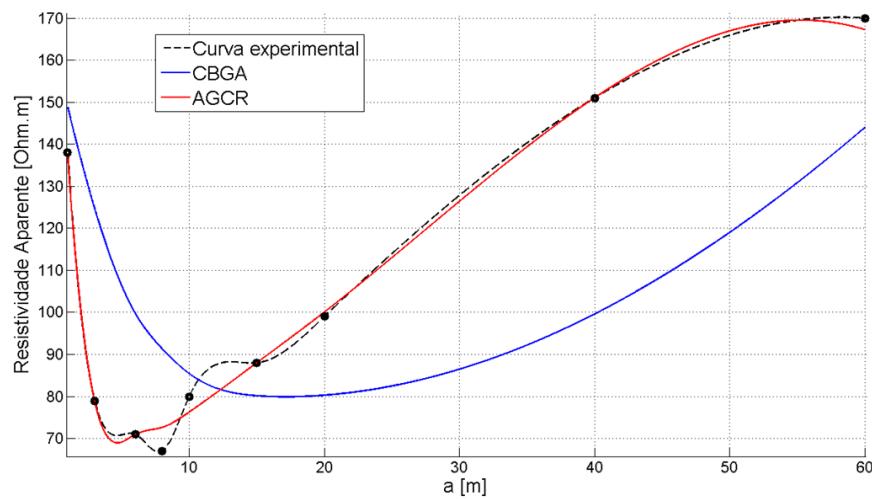


Figura 5.19 - Caso 12 - Curvas de resistividades aparentes.

Tabela 5.36 - Caso 12 - Valores das resistividades aparentes teóricas.

CBGA [$\Omega \cdot m$]	AGCR [$\Omega \cdot m$]
148, 87	137, 12
124, 71	78, 76
99, 80	70, 96
91, 32	72, 67
85, 40	76, 28
80, 16	88, 01
80, 29	100, 07
99, 63	151, 03
143, 97	167, 23

Na Tab. 5.38 são apresentados os resultados da estratificação horizontal do solo em várias camadas produzido por cada método.

Tabela 5.37 - Caso 12 - Diferenças entre as curvas experimental & teóricas.

CBGA [%]	AGCR [%]
-7,8779	0,6318
-57,8646	0,2941
-40,5773	0,0518
-36,3072	-8,4707
-6,7559	4,6489
8,9080	-0,0213
18,8891	-1,0809
34,0133	-0,0249
15,3117	1,6294

Tabela 5.38 - Caso 12 - Resultados da estratificação do solo.

Camadas (i)	CBGA [$\Omega \cdot m$]	AGCR [$\Omega \cdot m$]
ρ_1	164,5	461,56
ρ_2	71,6	62,80
ρ_3	203,7	246,51
h_1	1,2	0,42
h_2	10,6	4,49
h_3	∞	∞

5.3.5 Estudo de Caso 13

Este estudo foi retirado do trabalho ([GONOS; STATHOPULOS, 2005](#)) onde os autores utilizam um *Classical Binary Genetic Algorithm* (CBGA). Os autores realizam vários testes com resultados encontrados em outros trabalhos e tem a metodologia desenvolvida com base em um pacote de software. Os autores consideraram este solo estratificado em 2-camadas.

Com a mesma curva de resistividade aparente experimental do trabalho ([GONOS; STATHOPULOS, 2005](#)), Dawalibi & Blattner resolvem o mesmo problema de otimiza-

ção, no entanto, utilizando uma técnica de interpretação que inclui curvas gráficas em conjunto com um software que utiliza o *Method of Steepest-Descent* (MSD) ao qual a curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$ pode ser diretamente comparada com várias curvas padrões (DAWALIBI; BLATTNER, 1984). Estes autores consideram também este solo estratificado com 2-camadas.

Na Tab. 5.39 são apresentados os valores dos espaçamentos entre os eletrodos a , os valores da resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$ e os valores das resistividades aparente teóricas $\rho_{aT}(a)$ encontradas pelos três métodos, AGCR, CBGA e o MSD. São apresentados na Tab. 5.40 as diferenças entre os valores da resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$ e os valores das resistividades aparente teóricas $\rho_{aT}(a)$ para cada método.

Tabela 5.39 - Caso 13 - Valores das resistividades aparentes experimentais e teóricas para os métodos AGCR, CBGA & MSD.

a [m]	ρ_{aE} [$\Omega \cdot m$]	ρ_{aT} AGCR [$\Omega \cdot m$]	ρ_{aT} CBGA [$\Omega \cdot m$]	ρ_{aT} MSD [$\Omega \cdot m$]
2,5	327,43	327,40	319,99	326,94
5,0	233,88	233,79	233,12	233,60
7,5	187,43	187,41	186,47	187,35
10,0	168,03	168,05	165,94	168,03
12,5	159,53	159,52	156,62	159,52
15,0	155,35	155,33	151,99	155,34

Na Fig. 5.20 são ilustradas as curvas de resistividades aparentes experimentais e teóricas do Caso 13.

Observa-se na Tab. 5.40, que o desvio total obtido pelo CBGA entorno de 8% é satisfatório. Este mesmo caso foi resolvido utilizando o MSD e o desvio total obtido ficou entorno de 0,3%. Contudo, o resultado obtido pelo AGCR ficou ainda menor, entorno de 0,07% (veja Tab. 5.39 e Tab. 5.40). Observa-se na Fig. 5.20, que a curva de resistividade aparente experimental tem um comportamento não sinuoso, o que facilita o processo de otimização. Na Tab. 5.41 estão dispostos os resultados da estratificação dos três métodos utilizados.

Tabela 5.40 - Caso 13 - Valores das diferenças para os métodos AGCR, CBGA & MSD.

a [m]	Desvio [%]	Desvio [%]	Desvio [%]
	AGCR	CBGA	MSD
$a = 2,5$	0,0070	2,2722	0,1497
$a = 5,0$	0,0374	0,3250	0,1197
$a = 7,5$	0,0097	0,5122	0,0427
$a = 10,0$	-0,0127	1,2438	0,0000
$a = 12,5$	0,0039	1,8241	0,0063
$a = 15,0$	0,0070	2,1629	0,0064
$f(x)$	0,0776	8,3402	0,3248

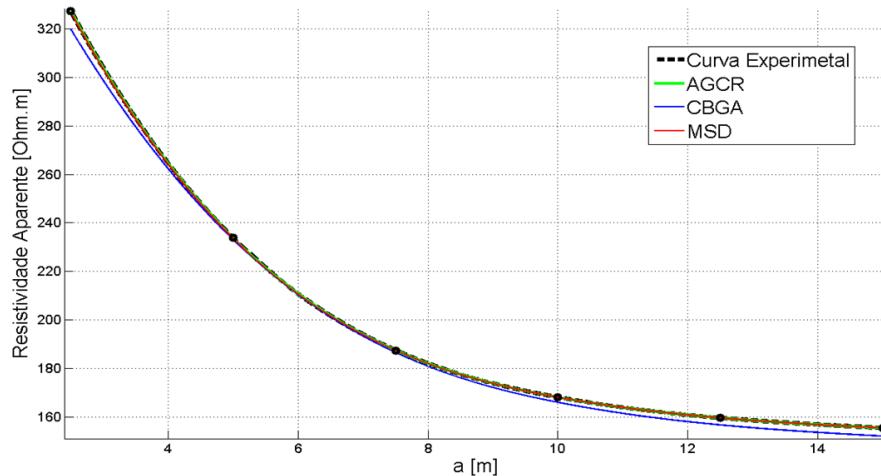


Figura 5.20 - Caso 13 - Curvas de resistividades aparentes.

Tabela 5.41 - Caso 13 - Resultados das estratificações do solo.

Camada (i)	AGCR	CBGA	MSD
ρ_1 [$\Omega \cdot m$]	383,63	367,73	383,00
ρ_2 [$\Omega \cdot m$]	147,69	143,56	147,70
h_1 [m]	2,56	2,70	2,56
h_2 [m]	∞	∞	∞

5.3.6 Estudo de Caso 14

Esta estratificação foi retirada do trabalho ([del ALAMO, 1991](#)). Neste trabalho o autor utiliza como métodos de otimização uma *Gradient Technique with Method Newton-Raphson* (GTNR). Em seu trabalho, del Alamo compara seu resultado com resultados de outros métodos e considera seus resultados de estratificação para este solo, aceitáveis com 2-camadas.

Com a mesma curva de resistividade aparente experimental utilizada em ([del ALAMO, 1991](#)), Lagacé et al. realiza novos estudos utilizando uma *Least-Squared Minimization Techniques* (LSMT) ([LAGACÉ et al., 1996](#)). No entanto, Lagacé et al. consideram este solo estratificado com 3-camadas enquanto del Alamo considera a sua estratificação com 2-camadas.

Na Tab. 5.42 são apresentados os valores dos espaçamentos entre os eletrodos a e os valores da curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$. Na Tab. 5.43 estão apresentados os valores das curvas de resistividades aparentes teóricas $\rho_{aT}(a)$ encontrados por cada método, tanto para 2-camadas como para 3-camadas. A Tab. 5.44 dispõem os valores das diferenças produzidos pelos três métodos, tanto para 2-camadas como para 3-camadas.

Tabela 5.42 - Caso 14 - Valores da resistividade aparente experimental e as distâncias entre as hastes.

a [m]	$\rho_{aE}(a)$ [$\Omega \cdot m$]
1,0	136,0
2,0	140,0
4,0	214,0
10,0	446,0
20,0	685,0
40,0	800,0

São ilustradas na Fig. 5.21 as curvas de resistividades aparentes experimental e teóricas para todos os métodos de otimização utilizados no Caso 14.

Observa-se nos resultados dispostos na Tab. 5.44 que quando se faz uma estratifi-

Tabela 5.43 - Caso 14 - Valores das resistividades aparentes teóricas para os métodos AGCR, GTNR & LSMT.

ρ_{aT} AGCR 2-camadas [$\Omega \cdot m$]	ρ_{aT} GTNR 2-camadas [$\Omega \cdot m$]	ρ_{aT} AGCR 3-camadas [$\Omega \cdot m$]	ρ_{aT} LSMT 3-camadas [$\Omega \cdot m$]
136,00	141,77	135,95	130,99
151,79	168,77	149,95	147,32
214,47	253,71	212,24	214,95
407,46	456,81	438,45	439,85
607,46	631,25	681,79	693,69
800,00	769,85	797,10	809,58

Tabela 5.44 - Caso 14 - Valores das diferenças para os métodos AGCR, GTNR & LSMT.

Desvio [%] AGCR 2-camadas	Desvio [%] GTNR 2-camadas	Desvio [%] AGCR 3-camadas	Desvio [%] LSMT 3-camadas
0,0000	-4,2490	0,0360	3,6806
-8,4266	-20,5549	-7,1108	-5,2323
-0,2204	-18,5583	0,8193	-0,4485
8,6412	-2,4339	1,6924	1,3777
11,3187	7,8461	0,4677	-1,2692
0,0000	3,7683	0,3621	-1,1982
28,6070	57,4005	10,4883	13,2065

cação do solo e não se considera o número de camadas N como um parâmetro a ser também otimizado, pode-se levar a resultados não aceitáveis na prática. Em ([del ALAMO, 1991](#)), considerando o solo estratificado em 2-camadas, obtém-se um desvio total entorno de 57% para o método GTNR, enquanto o AGCR fica entorno de 28%, que ainda é uma valor elevado para o desvio. Tendo como base os mesmos dados, porém, considerando o solo estratificado em 3-camadas, obtém-se para o LSMT ([LAGACÉ et al., 1996](#)), um desvio total entorno de 13%, enquanto o AGCR resulta em um desvio total entorno dos 10%, o que já é aceitável na prática.

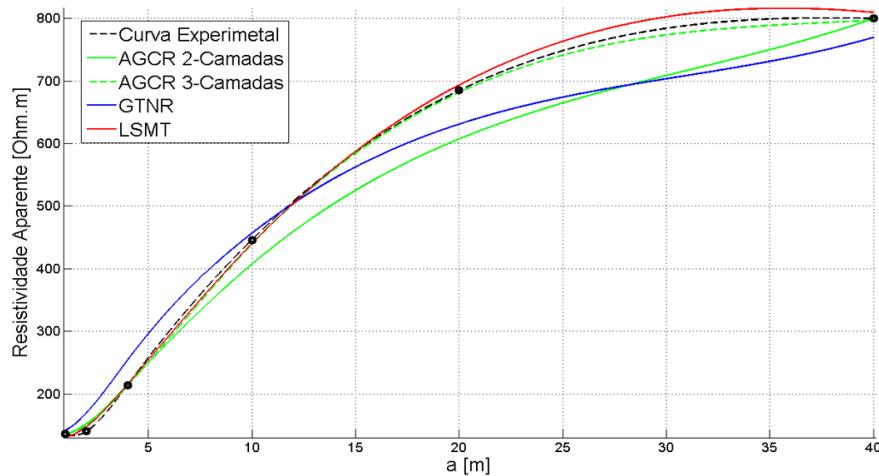


Figura 5.21 - Caso 14 - Curvas de resistividades aparentes.

Comparando os resultados do AGCR para o solo do Caso 14, estratificado em 2-camadas e em 3-camadas, observa-se uma diferença no desvio total entorno de 63,34% menor para o caso onde é considerado o solo em 3-camadas, ou seja, este solo corresponde ao modelo de solo estratificado horizontalmente, se for considerado com mais de 3-camadas. A Tab. 5.45 dispõem os resultados da estratificação do Caso 14 para os três métodos.

Tabela 5.45 - Caso 14 - Resultados das estratificações do solo.

Camada (<i>i</i>)	AGCR 2-camadas	GTNR 2-camadas	AGCR 3-camadas	LSMT 2-camadas
$\rho_1 [\Omega \cdot m]$	133,07	135,98	133,50	128,00
$\rho_2 [\Omega \cdot m]$	1033,04	890,42	2495,00	1930,00
$\rho_3 [\Omega \cdot m]$	— — —	— — —	257,10	520,00
$h_1 [m]$	3,00	2,32	3,40	3,10
$h_2 [m]$	∞	∞	15,00	15,00
$h_3 [m]$	— — —	— — —	∞	∞

Observe que nos resultados, Tab. 5.45, as variações nos valores de ρ_1 ficam entorno de 5,87% entre os diferentes métodos, considerando tanto 2-camadas como 3-camadas, enquanto as variações nos valores de ρ_2 chegam a 64,31%. Isto ocorre porque as

funções a serem otimizadas correspondem a modelos não lineares e a quantidade de parâmetros define a curva a ser otimizada.

5.3.7 Estudo de Caso 15

Esta aplicação prática foi retirada do trabalho ([del ALAMO, 1993](#)). Neste trabalho o autor aplica várias técnicas de otimização em alguns problemas. Para o caso aqui apresentado, os resultados foram obtidos utilizando o *First Order Gradient Technique* (FOGT), este trabalho considera o solo estratificado com 2-camadas.

São apresentados na Tab. [5.46](#) os valores dos espaçamentos entre os eletrodos a , os valores das resistividades aparente experimental $\rho_{aE}(a)$ e os valores encontrados para as resistividades aparentes teóricas produzidos pelo AGCR e o FOGT. Na Tab. [5.47](#) estão dispostos os valores encontrados para as diferenças entre as curvas experimental e teóricas utilizando os dois métodos.

Tabela 5.46 - Caso 15 - Valores das resistividades aparentes experimental e teóricas para os métodos AGCR & FOGT.

a [m]	ρ_{aE} [$\Omega \cdot m$]	ρ_{aT} AGCR [$\Omega \cdot m$]	ρ_{aT} FOGT [$\Omega \cdot m$]
2, 5	320, 0	320, 00	297, 31
5, 0	245, 0	226, 62	234, 34
7, 5	182, 0	182, 00	191, 84
10, 0	162, 0	163, 79	169, 79
12, 5	168, 0	155, 86	158, 61
15, 0	152, 0	152, 00	152, 67

Neste estudo, o desempenho do AGCR leva a uma solução com valor da função de avaliação 42,84% menor que o valor da função de avaliação do FOGT. Na Tab. [5.48](#) encontra-se os resultados obtidos para esta estratificação. Na Fig. [5.22](#) são ilustradas as curvas de resistividades aparentes experimental e teóricas do Caso 15.

Tabela 5.47 - Caso 15 - Valores das diferenças para os métodos AGCR & FOGT.

a [m]	Desvio [%]	Desvio [%]
	AGCR	FOGT
$a = 2,5$	0,0000	7,0892
$a = 5,0$	7,4988	4,3494
$a = 7,5$	0,0000	-5,4082
$a = 10,0$	-1,1059	-4,8101
$a = 12,5$	7,2205	5,5875
$a = 15,0$	0,0000	-0,4414
$f(x)$	15,8253	27,6858

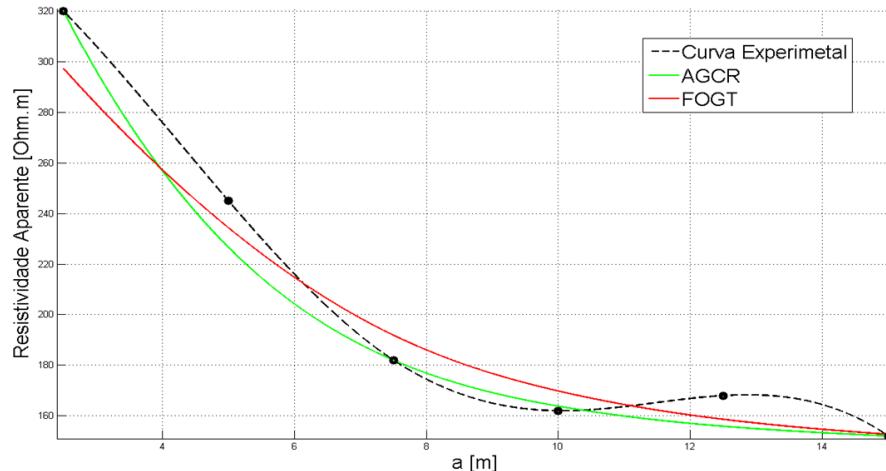


Figura 5.22 - Caso 15 - Curvas de resistividades aparentes.

Observa-se na Tab. 5.48 que a discrepância entre os valores dos parâmetros (resultados da estratificação) encontrados, é de 12,68% em média, enquanto a diferença da função de avaliação entre os métodos fica entorno de 42,84%. Isto é indicativo de que uma pequena variação nos valores dos parâmetros provoca uma grande variação nos valores da curva $\rho_a T(a)$.

5.3.8 Estudo de Caso 16

Esta estratificação foi retirada do trabalho (GONOS; STATHOPULOS, 2005). Neste trabalho os autores utilizam um *Classical Binary Genetic Algorithm* (CBGA) e

Tabela 5.48 - Caso 15 - Resultados das estratificações do solo.

Camada (i)	AGCR	FOGT
$\rho_1 [\Omega \cdot m]$	378, 38	324, 60
$\rho_2 [\Omega \cdot m]$	144, 90	141, 45
$h_1 [m]$	2, 49	3, 17
$h_2 [m]$	∞	∞

consideram o solo estratificado com 3-camadas. Usando a mesma curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$, resolve-se o problema de otimização utilizando um AGCR sem o Operador de Evolução Dirigido, que será denotado de AGP e o AGCR, os resultados são então comparados.

A Tab. 5.49 dispõem os valores dos espaçamentos entre os eletrodos a , os valores das resistividades aparente experimental $\rho_{aE}(a)$ e os valores das resistividades aparentes teóricas $\rho_{aT}(a)$ produzidos pelos três métodos, AGCR, CBGA e o AGP. Na Tab. 5.50 estão disposto os valores das diferenças.

Tabela 5.49 - Caso 16 - Valores das resistividades aparentes experimental e teóricas para os métodos AGCR, CBGA & AGP.

a [m]	ρ_{aE} [$\Omega \cdot m$]	ρ_{aT} AGCR [$\Omega \cdot m$]	ρ_{aT} CBGA [$\Omega \cdot m$]	ρ_{aT} AGP [$\Omega \cdot m$]
1, 0	214, 0	214, 06	203, 51	211, 27
3, 0	256, 0	255, 16	250, 93	242, 90
5, 0	273, 0	290, 43	282, 50	274, 64
10, 0	307, 0	306, 86	294, 37	295, 96
15, 0	284, 0	284, 05	274, 82	279, 41
20, 0	250, 0	257, 93	252, 74	256, 75
30, 0	225, 0	222, 31	222, 06	222, 70
50, 0	210, 0	196, 08	198, 47	195, 08
80, 0	186, 0	187, 18	190, 00	185, 05

Os parâmetros encontrados pelo AGCR produz um desvio de 33, 57% menor quando comparados com o valor da diferença obtido pelo CBGA. O mesmo valor da diferença

Tabela 5.50 - Caso 16 - Valores das diferenças para os métodos AGCR, CBGA & AGP.

Desvio [%] AGCR	Desvio [%] CBGA	Desvio [%] AGP
-0,0287	4,8899	1,2750
0,3243	1,9775	5,1170
-6,3854	-3,4820	-0,6017
0,0437	4,1133	3,5932
-0,0191	3,2299	1,6143
-3,1744	-1,0985	-2,7036
1,1920	1,3043	1,0186
6,6270	5,4892	7,1041
-0,6392	-2,1544	0,5056
18,4339	27,7489	23,5332

total obtido pelo AGCR, agora em comparação com o AGP, é de aproximadamente 21,67% menor (veja Tab. 5.50).

Na Fig. 5.23 são ilustradas as curvas de resistividades aparentes experimental e teóricas do Caso 16 e na Tab. 5.51 encontra-se os resultados obtidos pelos três métodos para esta estratificação.

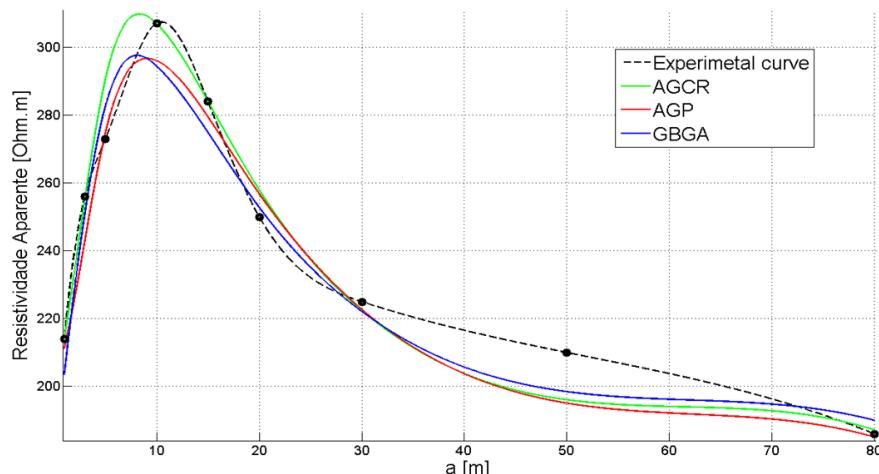


Figura 5.23 - Caso 16 - Curvas de resistividades aparentes.

Tabela 5.51 - Caso 16 - Resultados das estratificações do solo.

Camada (i)	AGCR	CBGA	AGP
$\rho_1 [\Omega \cdot m]$	209, 76	196, 90	208, 40
$\rho_2 [\Omega \cdot m]$	395, 60	351, 70	375, 49
$\rho_3 [\Omega \cdot m]$	182, 33	185, 20	179, 53
$h_1 [m]$	2, 12	1, 70	2, 39
$h_2 [m]$	7, 33	8, 40	7, 93
$h_3 [m]$	∞	∞	∞

Nesta estratificação, foi utilizado o AGP na tentativa de obter resultados de comparação entre tempo de execução e número de gerações utilizando o OED. A Tab. 5.52 apresenta alguns valores encontrados no desempenho de três dos métodos utilizados, (MQ-N, AGP e o AGCR).

Tabela 5.52 - Caso 16 - Avaliação entre o AGCR e o AGP(em minuto).

Método	n	g	$t [minuto]$	$F(x^*)$
MQ-N	--	--	3, 12	25, 3457
AGP	20	100	8, 02	23, 5332
AGCR	20	100	9, 08	18, 4339

Nos dados da Tab. 5.52, é observado que o MQ-N obteve um tempo menor de execução em relação ao AGP e o AGCR. No entanto, o AGCR obteve um valor menor para a função de avaliação $f(\underline{x})$. Comparando o AGP com o AGCR, observa-se que o $AGCR = AGP + OED$ e o tempo que o AGCR levou a mais para executar esta tarefa foi exatamente o tempo de processamento do OED. Com isto, a diferença de 1,06 minutos que o AGCR gastou a mais em relação ao AGP, ou seja, 11,67% do tempo total gasto pelo AGP, foi utilizado na execução do OED, embora o AGCR tenha reduzido o valor de $F(x^*)$ em 21,67%.

5.3.8.1 Comentário 3

Através da metodologia proposta foi possível comparar nas Seção 5.3.1 e Seção 5.3.2 os valores das condutividade elétrica do solo da primeira camada. Estes valores

foram comparados com resultados obtidos através do método direto utilizando um Condutivímetro *glos.* e através da pasta de saturação obtida por análise laboratorial. Verifica-se uma proximidade entre os resultados obtidos pelo AGCR e o método direto utilizando o Condutivímetro *glos.* No entanto, o método que utiliza a pasta de saturação apresentou uma divergência entre os outros resultados. Isto ocorre porque a pasta de saturação não representa o solo com suas características físicas como umidade e compactação.

O método proposto estima a condutividade elétrica das demais camadas do solo e também suas respectivas profundidades. A solução utilizada na Agricultura de Precisão é a de enfocar grandes áreas e entendê-las como homogêneas, levando ao conceito da necessidade média para a aplicação dos insumos, defensivos, água etc. Para isto, o conhecimento do comportamento do solo quanto à sua propriedade condutora de eletricidade em toda a sua dimensão auxilia, pois, esta se relaciona com características físicas e químicas do solo e que permitem a recomendação de quantidades "localizadamente" adequadas de insumos para as culturas. O conhecimento detalhado das propriedades do solo para fins agrícolas envolve o conhecimento da sua variabilidade tridimensional. A variabilidade da profundidade das camadas de solo é regida por inúmeros fatores e influencia fortemente no seu aproveitamento pelo sistema radicular das culturas. Justifica-se assim a necessidade de um método de estratificação horizontal do solo que traduza com uma determinada precisão os valores da condutividade elétrica deste subsolo.

A Seção 5.3.3, apresenta uma estratificação onde os métodos das Imagens Complexas e método de Quase-Newton não tiveram uma boa performance. No entanto, o algoritmo genético alcançou valores dentro do esperado (veja Tab. 5.33). Nas Seção 5.3.4 à Seção 5.3.8, foram realizadas comparações entre o AGCR (Seção 4.5) em conjunto com a metodologia matemática proposta (Capítulo 3) e alguns trabalhos publicados onde os autores desenvolvem modelagens matemática que tem como base a expressão (2.8), que relaciona trechos crescentes e decrescentes da curva $\rho_a(a)$. A Fig. 5.19 e as Tab. 5.36 e Tab. 5.37 indica o melhor desempenho do AGCR. Esta melhoria esta relacionada aos fatores de exploração gradual do AGCR e da modelagem matemática desenvolvida.

Com relação ao Operador de Evolução Dirigido OED, um procedimento útil é, quando o OED for executado desprezar os 5 primeiros indivíduos da matriz M_I . A idéia de desprezar os primeiros indivíduos parte do pressuposto que no início do

processo de otimização, os indivíduos gerados e guardados na matriz M_I , não consegue apresentar evidencias de um padrão para que o OED possa reconhecer. A Fig. 5.24 ilustra valores de $f(\underline{x})$ para alguns indivíduos gerados pelo OED e pelo AGP apenas nas gerações onde o OED foi executado. Observe que no início quando o valor de g é pequeno, o valor de $f(\underline{x})$ encontrados pelo OED estão distante do valor de $f(\underline{x})$ encontrado pelo AGP, no entanto, com o passar das gerações, o padrão vai ficando evidente e os indivíduos encontrados pelo OED tem o valor de $f(\underline{x})$ menor.

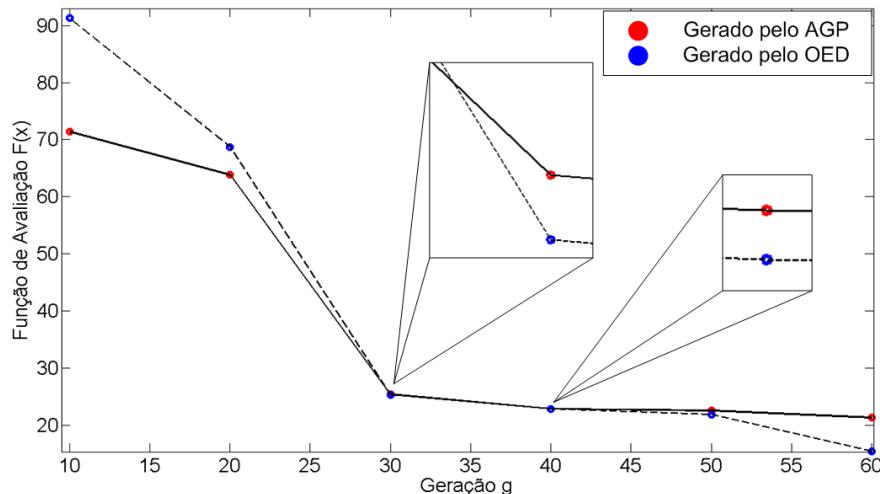


Figura 5.24 - Comparação entre soluções geradas (indivíduos).

Observando ainda a Fig. 5.24, a partir da 30^a geração, ou seja, a partir da terceira execução do OED, todos os melhores indivíduos nas gerações múltiplas de 10 foram encontradas pelo OED. Outro fator interessante foi observado, com a utilização do OED o fenômeno de estagnação foi diminuído nos casos simulados pois quando ele não encontra um indivíduo melhor que o da geração corrente, ele produz genes com boas características que podem, através do operador de crossover, fazer parte de um novo indivíduo com alto fitness. Analisando a Tab. 5.52 e sabendo que o OED foi utilizado de 10 em 10 gerações, tomando $g_{max} = 100$, tem-se que em média, para o processo de estratificação, o OED leva 6,36 segundos em cada execução enquanto o tempo médio gasto em cada geração é de 5,44 segundos.

Uma limitação da aplicação do método proposto é que, em alguns tipos de solos como é o caso apresentado na Seção 5.3.3, uma parcela do erro apresentado na estratificação e talvez a parcela que ainda resulta em desvios não minimizados, pode

ser causado pelo fato de que o solo não tem um comportamento bem definido estratificado em camadas horizontais (CALIXTO et al., 2010b). O processo de estratificação proposto obtém uma satisfatória precisão porque o AGCR opera continuamente na minimização do erro entre as curvas, no entanto, se os erros ainda persistem, conclui-se que o solo analisado, ou ele não se comporta em um modelo de camadas horizontalmente sobrepostas ou existe algo que está modificando o seu comportamento, como uma fenda vertical ou oblíqua, rochas etc., no local da estratificação interferindo nos resultados obtidos.

5.4 Aplicação da Estratificação 3D

O procedimento descrito na Seção 4.6 foi aplicado a quatro diferentes áreas. Nestes quatro estudos de casos, o terreno foi discretizado em subáreas de $4,5\text{ m} \times 4,5\text{ m}$, ou seja, $M = 4,5\text{ m}$.

O primeiro estudo refere-se a um área de $13,5\text{ m} \times 13,5\text{ m}$ e o segundo estudo, a uma área de $22,5\text{ m} \times 22,5\text{ m}$. O terceiro e quarto estudos foram conduzidos em duas áreas distintas de $36\text{ m} \times 36\text{ m}$. O mapeamento das resistividades e suas espessuras são apresentados a seguir em uma configuração 3D. Nesta configuração a escala de cor representa a profundidade d_i em que a camada i se encontra. Os gráficos gerados para os estudos apresentados nas Seção 5.4.2 e Seção 5.4.3 apresentam uma segunda camada que emergem na superfície do solo. Uma discussão sobre estes resultados são também apresentados nos comentários. Para cada caso de estratificação é apresentada uma tabela com o valor do representante global da resistividade ρ_i e do representante global da espessura h_i de cada camada e seus desvio padrão amostral (DPA), equação (4.23), $s_a(\bar{\rho}_i)$ e $s_a(\bar{h}_i)$, como descrito na Seção 4.6.

Os valores dos DPA quantifica a dispersão das espessuras de cada camada entre as diversas subáreas. Outros valores importantes para algumas aplicações são o da profundidade d_i com seus valores médios (\bar{d}_i) e seus DPA $s_a(\bar{d}_i)$, que estão dispostos nas tabelas de resultados. Os valores dos erros global médio E_g para cada estratificação, dado por (4.25) e a quantidade de locais a ser aplicado o método de Wenner $T(t, v)$ é dado por (4.22), são apresentados no texto, para cada estudo de caso. Em cada local de aplicação do método de Wenner quatro medidas foram tomadas para diferentes valores de a , isto é, a assume os valores: $0,3\text{ m}$, $0,5\text{ m}$, $0,9\text{ m}$ e $1,5\text{ m}$, resultando em $z = 4$.

5.4.1 Estudo de Caso 17

Neste estudo de caso a área analisada foi dividida em nove subáreas e o método de Wenner foi aplicado em $T(t, v) = 24$ localidades ao longo das arestas das subáreas. A estratificação obtida consiste em $N = 3$ camadas separadas por superfícies curvas mostradas na Fig. 5.25. A resistividade de cada camada e os DPA são apresentados na Tab. 5.53, o erro global médio encontrado nesta estratificação é igual a $E_g = 3,51\%$.

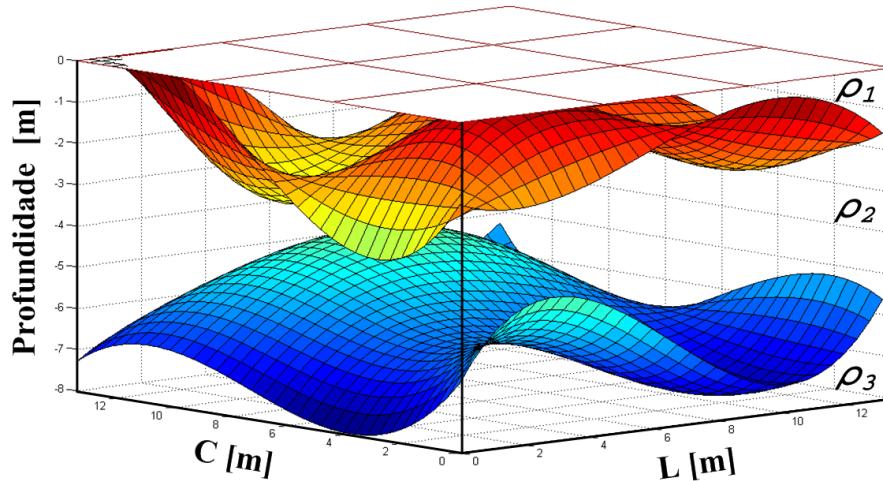


Figura 5.25 - Caso 17 - Superfícies interpoladas 3D.

Tabela 5.53 - Caso 17 - Valores de $\bar{\rho}_i$, \bar{h}_i , \bar{d}_i e seus DPA.

Camada (<i>i</i>)	$\bar{\rho}_i$ [$\Omega \cdot m$]	DPA $s_a(\rho_i)$	\bar{h}_i [m]	DPA $s_a(h_i)$	\bar{d}_i [m]	DPA $s_a(d_i)$
1	744	20,2	1,75	0,17	1,75	0,17
2	215	8,3	4,13	0,63	5,88	0,48
3	513	6,4	∞	--	∞	--

5.4.2 Estudo de Caso 18

Para este estudo de caso a área analisada foi dividida em 25 subáreas e as medidas foram coletas em $T(t, v) = 60$ localidades diferentes. A solução obtida para esta estratificação apresentou $N = 3$ camadas, dispostas na Fig. 5.26. A resistividade de cada camada e os DPA são apresentados na Tab. 5.54 e o erro global médio encontrado nesta estratificação é igual a $E_g = 3,16\%$.

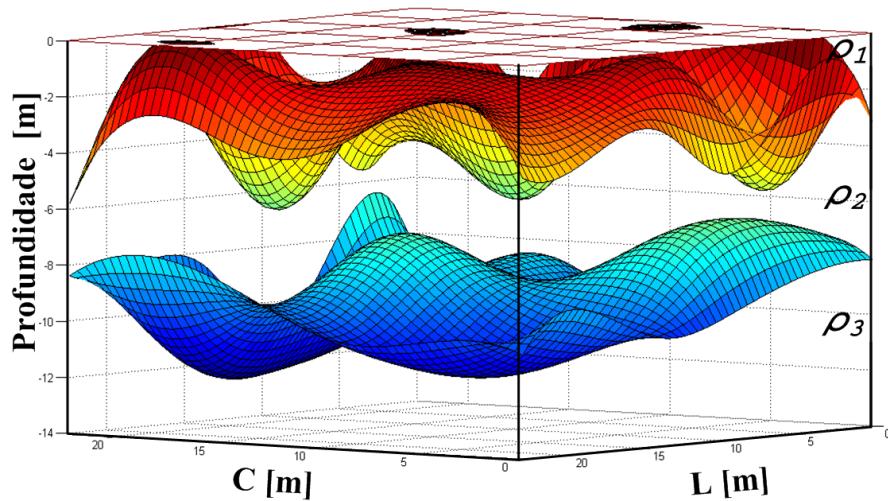


Figura 5.26 - Caso 18 - Superfícies interpoladas 3D.

Tabela 5.54 - Caso 18 - Valores de $\bar{\rho}_i$, \bar{h}_i , \bar{d}_i e seus DPA.

Camada (i)	$\bar{\rho}_i$ [$\Omega \cdot m$]	DPA $s_a(\rho_i)$	\bar{h}_i [m]	DPA $s_a(h_i)$	\bar{d}_i [m]	DPA $s_a(d_i)$
1	1047	24,6	2,32	0,60	2,32	0,60
2	1848	34,0	7,05	0,79	9,37	0,28
3	11109	136,1	∞	--	∞	--

5.4.3 Estudo de Caso 19

Nesta análise, a área estudada foi dividida em 64 subáreas e o método de Wenner foi aplicado em $T(t, v) = 144$ localidades. A solução desta estratificação obteve $N = 3$ camadas, apresentadas na Fig. 5.27. A resistividade de cada camada e os DPA são apresentados na Tab. 5.55, o erro global médio encontrado nesta estratificação é igual a $E_g = 11,12\%$

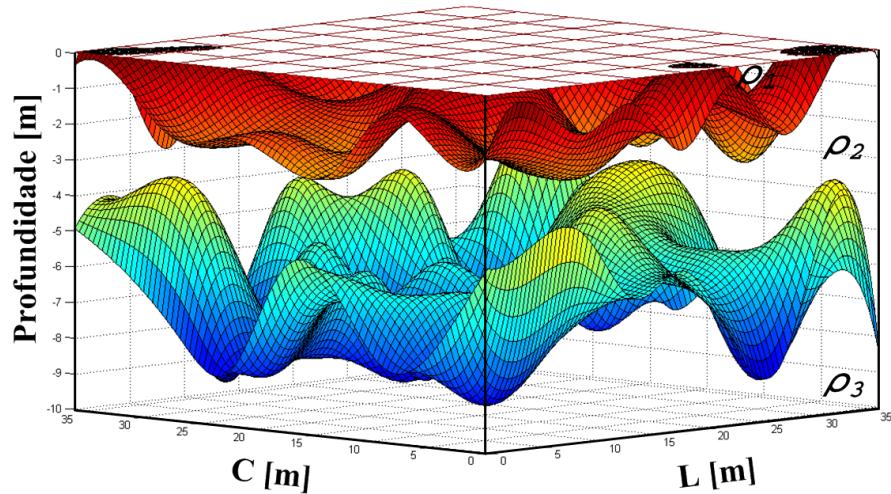


Figura 5.27 - Caso 19 - Superfícies interpoladas 3D.

Tabela 5.55 - Caso 19 - Valores de $\bar{\rho}_i$, \bar{h}_i , \bar{d}_i e seus DPA.

Camada (<i>i</i>)	$\bar{\rho}_i$ [$\Omega \cdot m$]	DPA $s_a(\rho_i)$	\bar{h}_i [m]	DPA $s_a(h_i)$	\bar{d}_i [m]	DPA $s_a(d_i)$
1	627	12,8	1,45	0,19	1,45	0,19
2	471	31,5	5,03	0,47	6,48	0,30
3	317	7,2	∞	--	∞	--

5.4.4 Estudo de Caso 20

Neste estudo de caso a área analisada foi dividida em 64 subáreas e as medidas foram coletadas em $T(t, v) = 144$ localidades. A estratificação obtida consiste em $N = 4$ camadas separadas por superfícies curvas mostradas na Fig. 5.28. A resistividade de cada camada e os DPA são apresentados na Tab. 5.56, o erro global médio encontrado nesta estratificação é igual a $E_g = 2,85\%$.

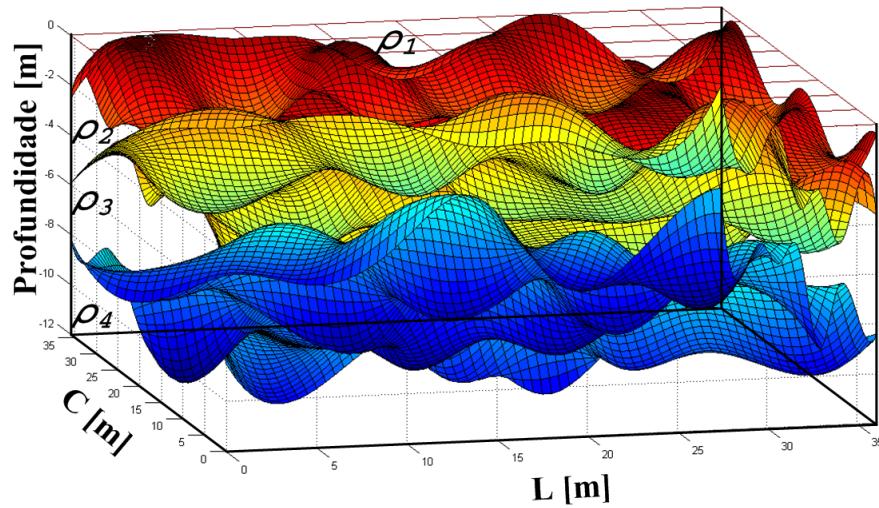


Figura 5.28 - Caso 20 - Superfícies interpoladas 3D.

Tabela 5.56 - Caso 20 - Valores de $\bar{\rho}_i$, \bar{h}_i , \bar{d}_i e seus DPA.

Camada (i)	$\bar{\rho}_i$ [$\Omega \cdot m$]	DPA $s_a(\rho_i)$	\bar{h}_i [m]	DPA $s_a(h_i)$	\bar{d}_i [m]	DPA $s_a(d_i)$
1	1792	51,3	1,42	0,20	1,42	0,20
2	5723	76,6	3,02	0,27	4,45	0,17
3	8871	42,7	4,54	0,33	8,99	0,17
4	19835	66,8	∞	--	∞	--

5.4.4.1 Comentário 4

Os gráficos que representam as superfícies de separação entre as camadas 3D tem gradientes diferentes, assim, deve-se observar o fato de que as escalas verticais e horizontais são também diferentes, fazendo com que estes gráficos pareçam mais senoidais do que eles realmente são. Este fato fica explícito ao comparar as dimensões das Fig. 5.25 e Fig. 5.28, onde a última figura parece ser mais senoidal que a primeira.

Observa-se na Fig. 5.26 e Fig. 5.27 que as superfícies de separação da segunda camada submerge aparecendo na superfície do solo em alguns pontos. Estes pontos são identificados nas Fig. 5.29 e Fig. 5.30 por círculos. Entende-se que, nesses pontos, a primeiras camadas do solo tem uma espessura muito pequena inferior a 0,2 m.

Ao interpolar os valores de h_i na produção da superfícies de separação, isto acontece porque o método de interpolação utilizado para a visualização das superfícies causa um comportamento sinuoso na superfície interpolada. Em camadas muito finas ($< 0,20\text{ m}$) isso pode levar a valores de espessuras negativas em alguns pontos. Neste caso, a superfície interpolada da primeira camada pode atravessar o limite da superfície do solo em alguns pontos. Este problema é resolvido computacionalmente, impedindo a visualização de profundidades negativas. No entanto, pode haver locais onde realmente a primeira camada desapareça, e a segunda camada assuma seu lugar.

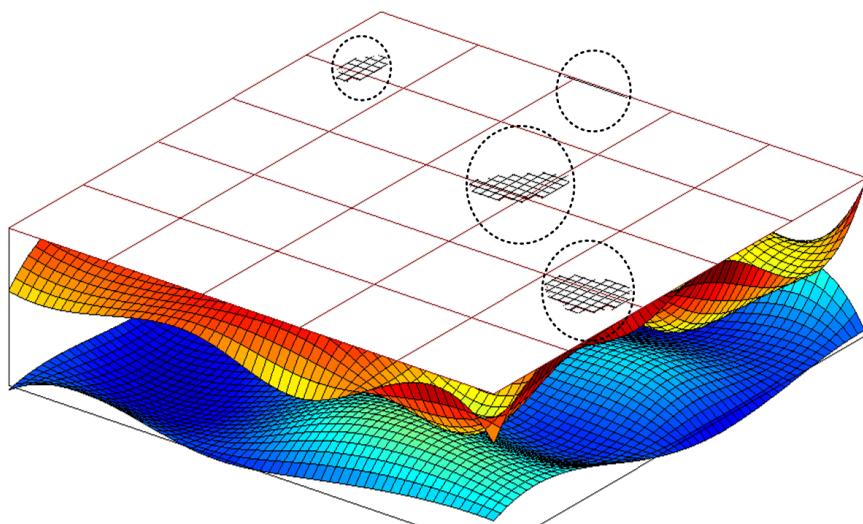


Figura 5.29 - Caso 18 - h_2 assume o lugar de h_1 , Fig. 5.26.

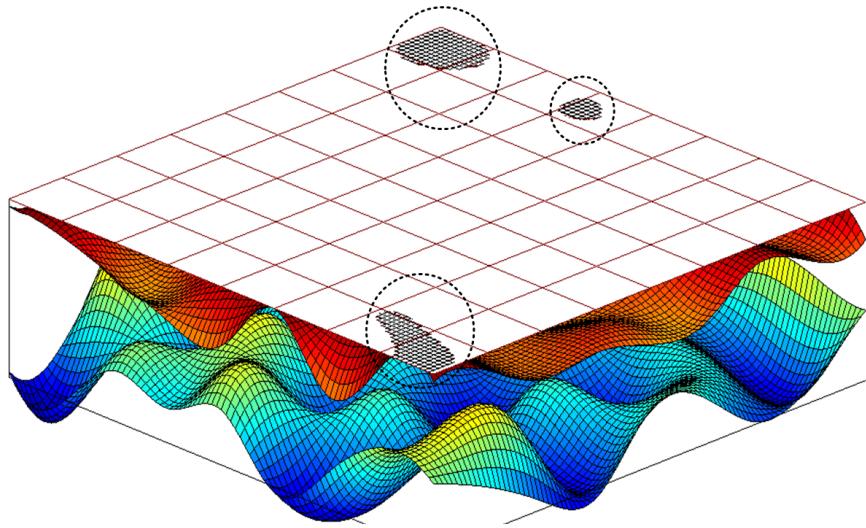


Figura 5.30 - Caso 19 - h_2 assume o lugar de h_1 , Fig. 5.27.

A fim de verificar se esse fenômeno é originado no processo de interpolação ou corresponde ao desaparecimento da primeira camada, deve-se visualizar as superfícies estratificadas, sem interpolação, como pode ser visto na Fig. 5.31. Para os estudo de caso das Seção 5.4.2 e Seção 5.4.3 realmente a primeira camada é muito fina (alguns locais $< 0,1 m$) em algumas subáreas, indicando que o procedimento de interpolação é o responsável pelo desaparecimento da primeira camada, fazendo $h_1 = 0$.

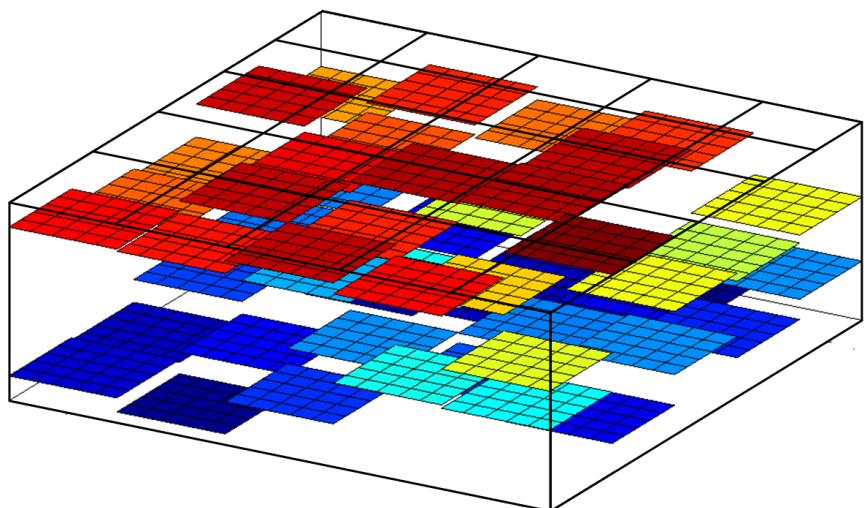


Figura 5.31 - Caso 18 - Superfícies não interpoladas, Fig. 5.26.

Na Fig. 5.32 é apresentado uma outra forma de visualizar as estratificações, permitindo uma comparação fácil de várias estratificações em uma configuração de camadas paralelas homogêneas. Na Fig. 5.32 as linhas brancas que cruzam os valores das profundidades horizontalmente, representam o DPA para cada profundidade das superfícies de separação. No eixo vertical esquerdo são apresentadas as profundidades d_i e na escala de cor à direita são apresentadas as resistividades ρ_i . Na Tab. 5.57 são dispostos os valores mínimos e máximos das profundidades na fronteira inferior de cada camada, para os casos estudados nas Seção 5.4.1 à Seção 5.4.4.

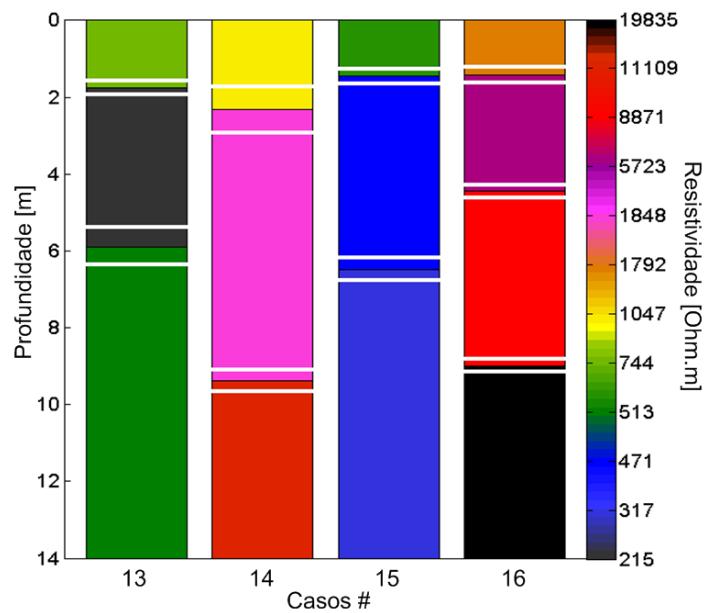


Figura 5.32 - Visualização em camadas paralelamente sobrepostas.

A Tab. 5.57 em conjunto com a Fig. 5.32, pode ser muito útil para uma localização precisa da implantação da malha de aterramento e outros propósitos. Os resultados de uma estratificação 3D podem ser visualizados numa tabela e/ou de várias formas gráficas, por exemplo, a Fig. 5.33 que une os dados da Tab. 5.57 e os da Fig. 5.32, apenas para o Estudo de Caso 17, resultando em uma possível região onde há uma alta probabilidade de se encontrar uma dada resistividade do solo ρ_i . Cada forma de visualização tem as suas vantagens e os seus inconvenientes.

A estratificação tridimensional pode ser considerada uma *TC scan* *glos.* do solo estratificado, podendo estimar blocos de rochas, fendas verticais etc., o que os outros métodos não permitem.

Tabela 5.57 - Valores máximos e mínimos das profundidades na fronteira inferior de cada camada.

Caso	Fronteira Inferior da Camada	Mínimo [m]	Máximo [m]
Seção 5.4.1	1	0,44	3,10
	2	4,79	7,05
	3	∞	∞
Seção 5.4.2	1	0,01	5,02
	2	6,91	11,33
	3	∞	∞
Seção 5.4.3	1	0,01	2,92
	2	3,20	9,59
	3	∞	∞
Seção 5.4.4	1	0,10	3,10
	2	2,57	6,32
	3	7,07	11,23
	4	∞	∞

Os erros $f(\underline{x})$ da estratificação de cada aresta relativamente às medidas experimentais podem ser, como dito anteriormente, de duas origens: ou é proveniente do fator numérico computacional, ou o solo não se adéqua ao modelo de camadas horizontais. Como o erro numérico computacional foi reduzido a valores desprezíveis relativamente aos erros normalmente aceitáveis na prática, só restando o erro da adequação do solo ao modelo de camadas horizontais. Portanto, pode-se afirmar que ao processar um caso real, se os erros obtidos forem aceitáveis, a estratificação obtida corresponde ao solo medido. Caso contrário, o solo não se adéqua ao modelo de camadas horizontais. Sugere-se, no entanto, que se repitam as medidas numa aresta sempre que surgir valores muito diferentes dos valores das arestas adjacentes. Os erros globais médios E_g obtidos nos últimos quatro casos apresentados variam entre os 2,9% e 11,1%.

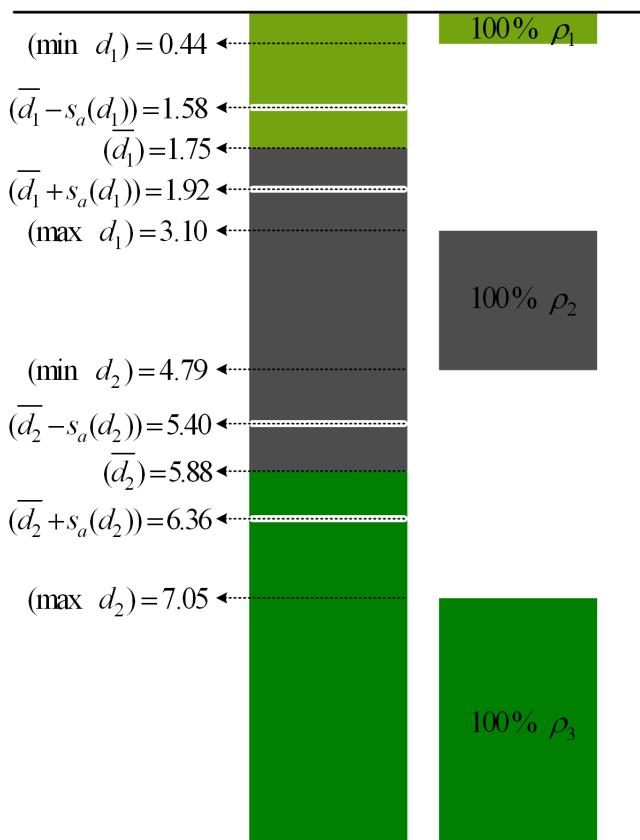


Figura 5.33 - Distribuição das profundidades das camadas para o Caso 17, Fig. 5.25.

5.5 Estratificação 3D com Solo Classificado

Nesta seção são estudadas três áreas distintas e como anteriormente na Seção 5.4, a aplicação do método foi realizada manualmente, cravando os eletrodos no solo e medindo os valores da condutividade $\sigma_a = \frac{1}{\rho_a}$ para construção da curva $\sigma_{Ex}(a)$. Em todos os terrenos, após a aplicação do método, foi aberta uma trincheira em uma de suas bordas para a identificação e classificação dos horizontes do solo. A localização da área com o *GPS* *glos.* foi feita nestas trincheiras.

Para uma melhor compreensão dos resultados apresentados nas tabelas, distingue-se horizonte pedogenético de camadas do solo. Por definição, horizonte pedogenético é uma seção do solo, aproximadamente paralela à superfície do solo, com características produzidas pelos processos de formação dos solos (SOIL SURVEY STAFF, 1999), e está ligado a diferentes características de composição química, textura, cor, porosidade, riqueza em matéria orgânica e/ou mineral.

Uma camada de solo é uma seção de constituição mineral ou orgânica, aproximadamente paralela à superfície do solo, possuindo um conjunto de propriedades não resultantes ou pouco influenciadas pela atuação dos processos pedogenéticos ([EMBRAPA, 1988](#)), e é utilizada na geoprospecção tendo em consideração a variação da condutividade elétrica σ_i do solo.

5.5.1 Estudo de Caso 21

O terreno deste estudo está localizado a $12^{\circ}58'385'' S$ e $46^{\circ}54'010'' W$ com uma altitude de $613\ m$. O material parental desse solo é composto por quartzitos micáceos e feldspáticos do Grupo Araí (Neoproterozóico). O perfil do solo (Fig. 5.34) foi descrito e classificado pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (*SiBCS*) ([EMBRAPA, 2006](#)) como Neossolo Litólico Distrófico léptico, epiálico, caulinítico, fase Cerrado tropical subcaducifólio, relevo forte ondulado e como Lithic Orthents pela Soil Taxonomy ([SOIL SURVEY STAFF, 1999](#)).



Figura 5.34 - Caso 21 - Perfil de Neossolo Litólico Distrófico léptico, epiálico, caulinítico, fase Cerrado tropical subcaducifólio, relevo forte ondulado pelo SiBCS ([EMBRAPA, 2006](#)) e Lithic Orthents pelo Soil Taxonomy ([SOIL SURVEY STAFF, 1999](#)).

A sequência de horizontes pedogenéticos encontra-se na Tab. 5.58.

Na observação macroscópica de amostras de rochas constataram-se dois tipos distintos: i) quartzitos, entremeados de delgadas camadas argilosas; ii) metassiltitos,

Tabela 5.58 - Caso 21 - Horizontes pedogenéticos.

Horizonte	Profundidade [m]
A	0 – 0,18
C_1	0,18 – 0,27
C_2	0,27 – 0,52
CR_1	0,52 +

com xistosidade pouco desenvolvida, entremeados com quartzo e feldspato. Em termos de elementos químicos, as rochas e os solos caracterizam-se pela sua pobreza em nutrientes, com saturação por cátions básicos da ordem de 9% no horizonte A e de cerca de 25% no sub-horizonte C_2 . Neste estudo a quantidade de locais onde foram efetuadas leituras é de $T(t, v) = 84$, resultando em 36 subáreas. A Fig. 5.35 apresenta uma visualização interpolada da estratificação deste terreno.

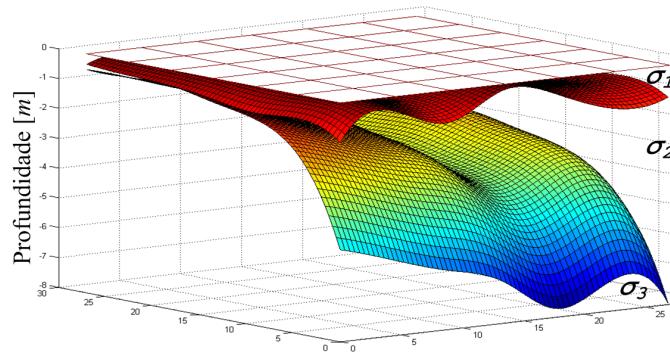


Figura 5.35 - Caso 21 - Visualização da estratificação com interpolação referente ao perfil da Fig. 5.34.

Na Tab. 5.59 são apresentados os valores globais das condutividades $\bar{\sigma}_i$ juntamente com suas espessuras \bar{h}_i e os desvios padrão amostrais $s_a(\sigma_i)$ e $s_a(h_i)$.

Na Tab. 5.58 tem-se que o intervalo entre o horizonte A e o horizonte C_2 é pertencente à primeira camada h_1 do solo, Tab. 5.59, enquanto o horizonte CR_1 pertence a segunda camada h_2 do solo. A baixa condutividade deste solo está relacionada com a baixa saturação por cátions básicos. A mineralogia aproximada (DIXON; SCHULZE, 2002) nas várias frações granulométricas no horizonte CR_1 é composta por: i) Argila (*DRX*): Caulinita (dominante), com inclusões de mica (muscovita); ii) Areia grossa:

Tabela 5.59 - Caso 21 - Valores médios e seus DPA.

Camada (<i>i</i>)	$\bar{\sigma}_i$ [mSm^{-1}]	DPA $s_a(\sigma_i)$	\bar{h}_i [m]	DPA $s_a(h_i)$
1	0,0290	$0,3518 \times 10^{-3}$	0,41	0,19
2	0,0032	$0,0062 \times 10^{-3}$	2,50	0,87
3	0,0517	$0,1082 \times 10^{-3}$	∞	--

100%; iii) Areia fina: até 96% de quartzo e quartzito. Cabe enfatizar que este tipo de solo não é indicado para qualquer tipo de exploração agrícola, devendo ser destinado à preservação ambiental.

5.5.2 Estudo de Caso 22

O terreno deste estudo de caso está localizado a $14^{\circ}23'625'' S$ e $47^{\circ}03'804'' W$ com uma altitude de 432 m. O material parental deste solo são sedimentos terciários e quaternários originados de arcóseos e pelitos da Formação Três Marias do Grupo Bambuí (Neoproterozóico).

Este perfil (Fig. 5.36) foi descrito e classificado pelo *SiBCS* como Plintossolo Argilúvico Concrecionário Distrófico e como Typic Plinthaqueox pelo Soil Taxonomy. Na Tab. 5.60 encontra-se a sequência dos horizontes pedogenéticos.

Tabela 5.60 - Caso 22 - horizontes pedogenéticos.

Horizonte	Profundidade [m]
<i>Ap</i>	0 – 0,20
<i>AB</i>	0,20 – 0,40
<i>E</i>	0,40 – 0,75
<i>Bfc₁</i>	0,75 – 0,90
<i>Bfc₂</i>	0,90 +

A Fig. 5.37 apresenta uma visualização interpolada da estratificação deste terreno.

Este é um solo com baixa drenagem hidráulica. A eventualidade desta má drenagem pode ser atribuída à ocorrência de plintita e petroplintita no horizonte *Bfc* (plintita



Figura 5.36 - Caso 22 - Perfil do Plintossolo Argilúvico Concrecionário Iéptico pelo SiBCS ([EMBRAPA, 2006](#)) e Typic Plinthaquox pelo Soil Taxonomy ([SOIL SURVEY STAFF, 1999](#)).

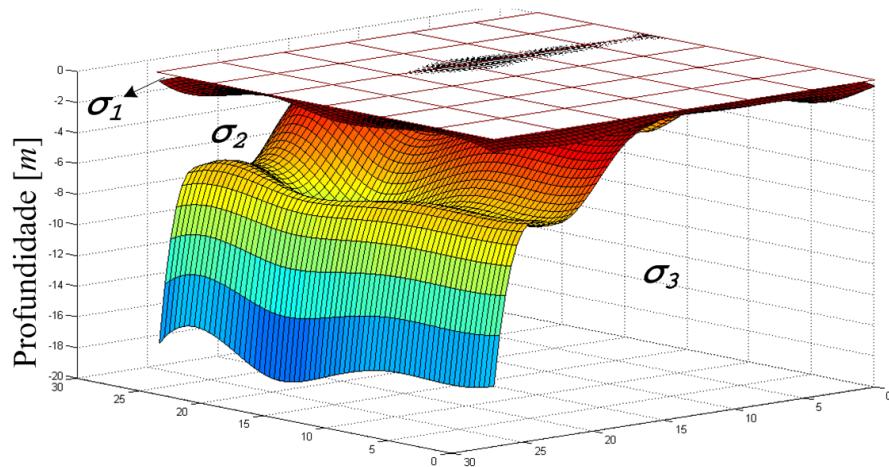


Figura 5.37 - Caso 22 - Visualização da estratificação com interpolação referente ao perfil da Fig. 5.36.

e concreções). Este solo pertence a um relevo plano. Neste estudo a quantidade de locais onde foram efectuadas leituras é de $T(t, v) = 84$, resultando em 36 subáreas.

Na Tab. 5.61 são apresentados os valores globais das condutividades $\bar{\sigma}_i$ juntamente com suas espessuras \bar{h}_i e seus desvios padrão amostrais.

Na Tab. 5.60, o intervalo entre o horizonte *Ap* e o horizonte *AB* pertence a primeira camada do solo, enquanto os horizontes *E*, *Bfc₁* e *Bfc₂* pertencem a segunda ca-

Tabela 5.61 - Caso 22 - Valores médios e seus DPA.

Camada (<i>i</i>)	$\bar{\sigma}_i$ [mSm^{-1}]	DPA $s_a(\sigma_i)$	\bar{h}_i [m]	DPA $s_a(h_i)$
1	35,1543	0,1223	0,36	0,18
2	191,4637	0,5088	1,42	0,93
3	10,4829	0,0214	∞	--

mada do solo, Tab. 5.61. A mineralogia aproximada (DIXON; SCHULZE, 2002) nas várias frações granulométricas no horizonte plíntico (*Bfc*) deste solo é composta por: i) Argila (*DRX*) Caulinita (dominante), com inclusões de gibbsita, mica e esmectita; ii) Cascalhos, 97% de nódulos, concreções ferruginosas e fragmentos concrecionários (Petroplintita) que restringem a permeabilidade e a drenagem livre; iii) Areia grossa, 65% de concreções ferruginosas e fragmentos concrecionários (Petroplintita) e 35% de quartzo + quartzito hialino; iv) Areia fina, 85% de quartzo e até 15% de concreções ferruginosas. Os altos valores obtidos para a condutividade deste solo estão associados ao alto índice de umidade do solo estratificado. Este alto índice de umidade associada com a presença de material rico em óxido de ferro com concentrações de concreções ferruginosas e associada aos quartzitos que contém 35% de magnésio faz com que este solo tenha uma boa condutividade elétrica.

5.5.3 Estudo de Caso 23

Este terreno está localizado a $14^{\circ}14'456'' S$ e $47^{\circ}03'328'' W$ com uma altitude de 458 m com relevo local e regional plano, fase Floresta Tropical caducifólia. Um corte do perfil deste terreno é ilustrado na Fig. 5.38.

A distribuição dos horizontes pedogenéticos obedecem à sequência apresentada na Tab. 5.62.

O material parental deste solo é calcário da Formação Lagoa do Jacaré do Grupo Bambuí (Neoproterozóico), com baixo grau de metamorfismo. O solo é classificado pelo *SiBCS* como Nitossolo Vermelho Eutrófico argissólico e pelo Soil Taxonomy como Typic Haplustult. A Fig. 5.39 apresenta uma visualização interpolada da estratificação deste terreno.

A mineralogia, de acordo com (DIXON; SCHULZE, 2002), possui composição aproxi-



Figura 5.38 - Caso 23 - Perfil do Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico pelo SiBCS ([EMBRAPA, 2006](#)) ([EMBRAPA, 2006](#)) e Typic Haplustult pelo Soil Taxonomy ([SOIL SURVEY STAFF, 1999](#)).

Tabela 5.62 - Caso 23 - Horizontes pedogenéticos.

Horizonte	Profundidade [m]
<i>A</i>	0 – 0,20
<i>AB</i>	0,20 – 0,55
<i>Bt</i> ₁	0,55 – 0,70
<i>Bt</i> ₂	0,70 – 1,25 +

mada nas respectivas frações no horizonte *Bt*₁, contendo: i) argila (*DRX*) predominantemente caulinita; ii) cascalhos, 90% nódulos e concreções ferruginosas ou esféricas, 5% de fragmentos de rocha alterada (tipo filitos), 5% de quartzo branco-hialino e traços de material carbonático; iii) areia grossa, 55% de nódulos e concreções ferruginosas ou esféricas, 40% de quartzo + quartzito, branco-hialino, com incrustações ferruginosas; iv) areia fina, 75% de quartzo branco-hialino, leitoso, com incrustações ferruginosas, 23% de concreções ferruginosas e 2% carvão + detritos. Neste estudo a quantidade de locais onde foram efectuadas leituras é de $T(t, v) = 144$, resultando em 64 subáreas.

Na Tab. 5.63 são apresentados os valores globais das condutividades $\bar{\sigma}_i$ juntamente com suas espessuras \bar{h}_i e os desvios padrão amostrais $s_a(\sigma_i)$ e $s_a(h_i)$.

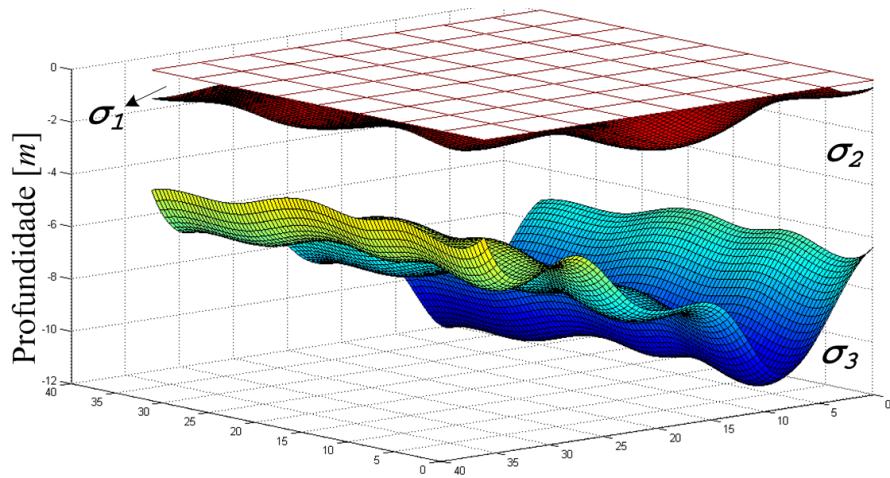


Figura 5.39 - Caso 23 - Visualização da estratificação com interpolação referente ao perfil da Fig. 5.38.

Tabela 5.63 - Caso 23 - Valores médios e seus DPA.

Camada (<i>i</i>)	$\bar{\sigma}_i$ [mSm^{-1}]	DPA $s_a(\sigma_i)$	\bar{h}_i [m]	DPA $s_a(h_i)$
1	2,4720	0,0072	0,84	0,26
2	2,5522	0,0070	7,77	0,27
3	0,4743	0,0031	∞	—

Na Tab. 5.62 e Tab. 5.63, observa-se que os horizontes pedogenéticos *A*, *AB* e *Bt*₁ pertencem a camada h_1 e apenas o horizonte *Bt*₂ pertence a segunda camada do solo. Nas camadas h_1 e h_2 os altos valores da condutividade elétrica estão relacionados com o elevado teor de argila no horizonte *Bt*, aproximadamente 70% maior que no horizonte diagnóstico *A* Chernozêmico. No horizonte *A* são encontrados altos teores de cálcio e de carbono. Na camada h_3 existe um elevado teor de cátions básicos, levando-a a ter uma condutividade elétrica baixa. Neste estudo, a concentração de cátions básicos em profundidade ocorre por este terreno pertencer a uma região onde a quantidade de chuva é suficiente para lixivar os cátions básicos para a camada h_3 . Assim, os cátions básicos removidos das duas camadas superiores são substituídos por hidrogênio e alumínio proveniente da alteração dos minerais. A acidificação das camadas h_1 e h_2 acontece, assim, por um processo natural, levando-as a ficarem eletricamente mais condutivas.

5.5.3.1 Comentário 5

Na Fig. 5.40 é apresentada a visualização do mapeamento das superfícies de separação entre as camadas do estudo de Caso 21 usando os valores de \bar{h}_i sem interpolação, ou seja, representando a estratificação realizada a cada subárea.

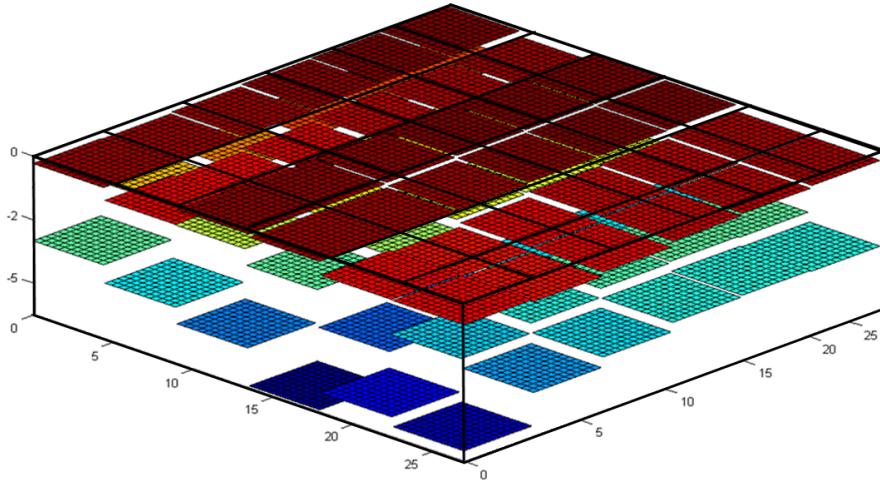


Figura 5.40 - Caso 21 - Visualização da estratificação sem interpolação referente ao perfil da Fig. 5.34.

Observe que os valores das condutividades elétricas e das espessuras apresentadas nas Tab. 5.59, Tab. 5.61 e Tab. 5.63 são valores médios ($\bar{\sigma}_i$ e \bar{h}_i), no entanto, mesmo tendo um valor pequeno do desvio padrão, estas condutividades e espessuras variam ao longo do terreno.

Assim, utilizando os valores obtidos das estratificações de cada subárea, pode-se produzir ainda um mapeamento bastante utilizado na agricultura de precisão. Este mapeamento traduz os dados processados em uma visualização das condutividades distribuídas sobre a superfície do solo. No método proposto, esta visualização pode ser obtida para cada uma das camadas do solo. Um exemplo desta forma de visualização é apresentado na Fig. 5.41.

A partir da Fig. 5.41 pode obter-se um mapa da variação da condutividade elétrica do solo através de curvas de isovalores de condutividade elétrica, por camadas, em que cada cor representa uma gama de valores de condutividade. A Fig. 5.42 apresenta a visualização da variação da condutividade no terreno do estudo de Caso 21, para a primeira e segunda camadas. Nesta figura, em cada camada, foram consideradas

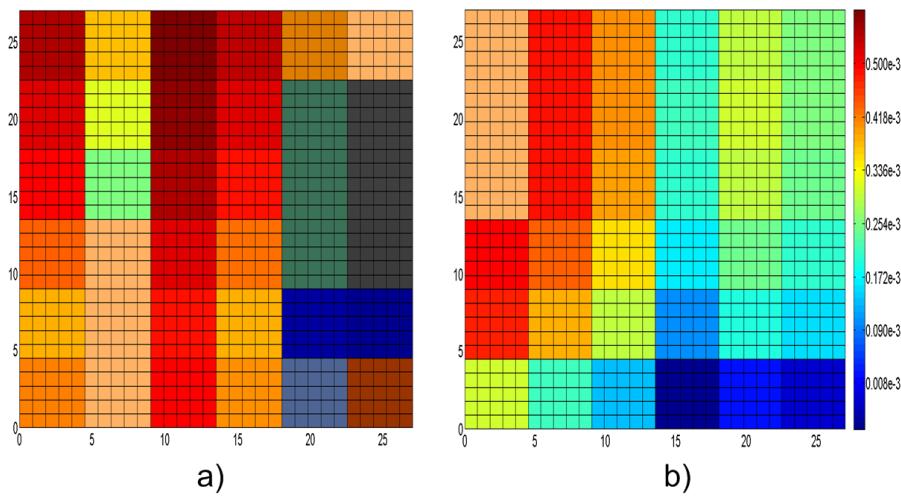


Figura 5.41 - Caso 21 - Visualização das condutividades por subárea referente ao perfil da Fig. 5.34. a) primeira camada. b) segunda camada.

15 gamas de valores da condutividade.

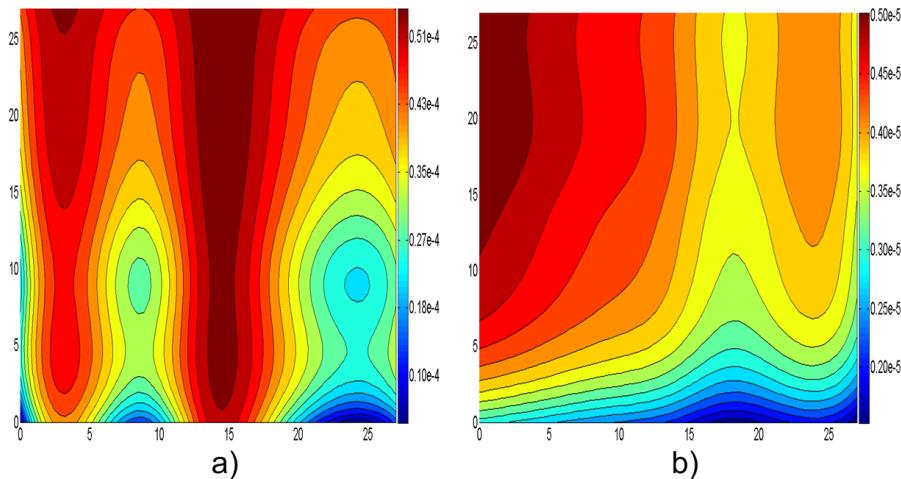


Figura 5.42 - Caso 21 - Curvas de isovalores referente ao perfil da Fig. 5.34. a) primeira camada. b) segunda camada.

Com o método proposto é possível determinar a que profundidade se encontra uma certa condutividade de um solo, a partir de um tratamento estatístico dos dados obtidos na estratificação das várias subáreas. Na Tab. 5.64 são apresentados alguns dados estatísticos relativos às profundidades das camadas nas várias subáreas do estudo de Caso 23, a partir dos quais se pode gerar a Fig. 5.43. Na Tab. 5.64 e na Fig. 5.43, d_i é a profundidade da superfície inferior de cada camada i .

Tabela 5.64 - Caso 23 - Valores das profundidades (média, mínima, máxima e desvio padrão) até onde vão as várias camadas.

Camadas (i)	\bar{d}_i [m]	Mínimo d_i [m]	Máximo d_i [m]	DPA $s_a(d_i)$
1	0,84	0,54	2,21	0,26
2	8,62	3,70	11,57	0,16
3	∞	∞	∞	--

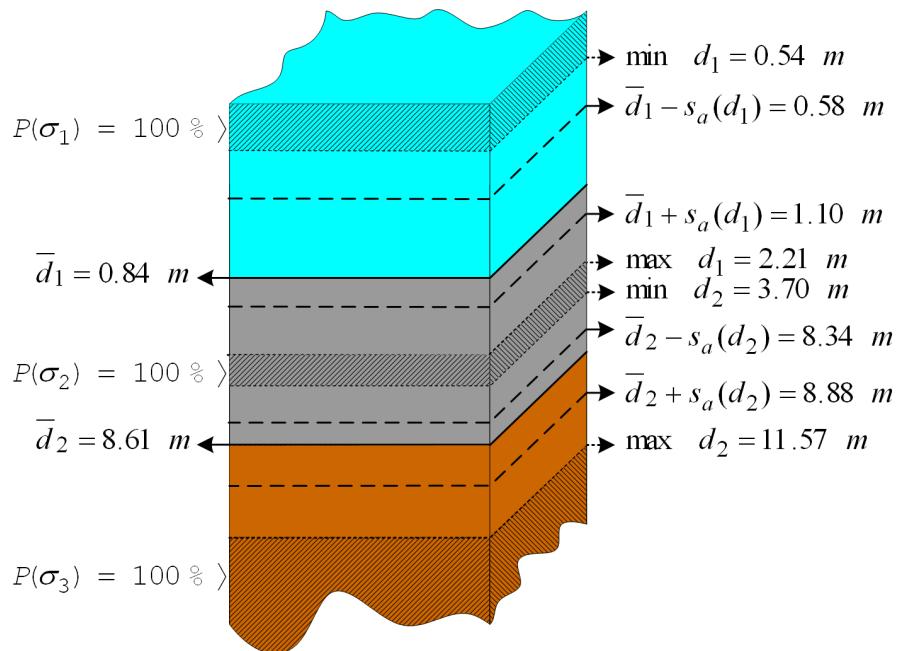


Figura 5.43 - Caso 23 - Distribuição das camadas em profundidade referente ao perfil da Fig. 5.38.

Observa-se na Tab. 5.64 e na Fig. 5.43, que para o solo estratificado do Caso 23, a primeira camada h_1 vai pelo menos até uma profundidade de $0,54 \text{ m}$ ($\min d_1$) em todo o terreno. Da mesma forma, no intervalo entre $2,21 \text{ m}$ ($\max d_1$) e $3,70 \text{ m}$ ($\min d_2$) está-se, garantidamente, na segunda camada (em qualquer ponto do terreno). Acima do valor de profundidade $11,57 \text{ m}$ ($\max d_2$) só existe terceira camada (em todo o terreno). Na Fig. 5.43 as profundidades hachuradas são aquelas em que é encontrada determinada camada (com a condutividade correspondente) com uma probabilidade de 100% (i.e., a essas profundidades só existe essa camada em todo o terreno).

Considerando uma distribuição normal gaussiana das espessuras das várias camadas, os dados da Tab. 5.64 e da Fig. 5.43 podem ser interpretados originando a Tab. 5.65, que apresenta a probabilidade de encontrar uma determinada camada i à profundidade d . Por exemplo, em uma profundidade de $1,10\ m$ ($\bar{d}_1 + s_a(d_1)$) a probabilidade $P(N_{h_1})$ de ainda se estar na primeira camada é de apenas 32% e a de se já estar na segunda camada $P(N_{h_2})$ é de 68%.

Tabela 5.65 - Caso 23 - Probabilidade de encontrar a camada N_i à profundidade d .

$d [m]$	$P(N_{h_1})$	$P(N_{h_2})$	$P(N_{h_3})$
[0, 0, 54]	100%	0%	0%
0, 58	68%	32%	0%
0, 84	50%	50%	0%
1, 10	32%	68%	0%
]2, 21, 370]	0%	100%	0%
8, 34	0%	68%	32%
8, 61	0%	50%	50%

O maior inconveniente na aplicação da estratificação 3D consiste na necessidade de efetuar uma grande quantidade de medidas em campo. Dependendo da dimensão da área a ser estratificada, a quantidade de medidas a ser realizadas pode tornar o processo oneroso. Na tentativa de anular este inconveniente, melhorando a aplicação do método proposto, propõem-se no Capítulo 6 um dispositivo que poderá promover uma facilidade na coleta de dados em campo.

Durante os estudos realizados, algumas características do solo foram sendo observadas. Um característica relacionada a variação da resistividade está ligada a umidade $\times pH$. Solos com alto teor de umidade tem resistividade elétrica mais baixa, desde que este solo não seja alcalino. A corrente elétrica I pode ser conduzida através do solo úmido de duas formas principais; i) a água intersticial que contém eletrólitos dissolvidos; ii) através de cátions móveis que existem perto da superfície das partículas do solo que são carregados eletricamente. Estes cátions reagem quimicamente com a água produzindo novos elementos químicos que são mais eletricamente condutivos. Este efeito, em solos com $pH < 7$ (solos ácidos), é responsável por uma variação no valor da resistividade elétrica do solo. Se o solo estudado tiver um

$pH > 7$ (solo alcalino), a variação da umidade não irá afetar significativamente o valor da resistividade. Portanto, é muito importante conhecer o pH do solo.

Sabendo o valor do pH , pode-se estimar se a resistividade do local onde se pretende construir uma subestação, por exemplo, terá uma grande variação durante as estações do ano. Ou seja, se o solo é ácido e está úmido, quando seca, o valor de sua resistividade vai aumentar. Por outro lado, se o solo é ácido e está seco, quando a umidade aumentar o valor de sua resistividade vai diminuir. Se o solo é alcalino sua resistividade elétrica não irá alterar significativamente com a sua umidade.

CAPÍTULO 6

DISPOSITIVO

Neste Capítulo será proposto um Dispositivo capaz de auxiliar na coleta de dados em campo para a produção da estratificação tridimensional. O verdadeiro atrativo deste Dispositivo está na minimização do tempo para realizar as coletas de dados em campo. A presente proposta refere-se a um Dispositivo que, sendo arrastado pela superfície do solo, é capaz de, utilizando o método de Wenner, coletar os dados pertinentes à estratificação do solo 3D.

6.1 Dispositivos Similares

Existem no mercado Dispositivos e técnicas diferenciadas para medir algumas propriedades físicas do solo que são utilizados na Agricultura de Precisão. As profundidades normalmente consideradas por estes Dispositivos são em torno de $h_a = 0.2\text{ m}$ e $h_b = 0.9\text{ m}$, dependendo do equipamento utilizado.

A resistividade elétrica é a medida da oposição de um material ao fluxo de corrente elétrica e é dada por:

$$\rho_i = \frac{A}{l} \cdot \frac{V}{I}, \quad (6.1)$$

onde $l\text{ [m]}$ é o comprimento e $A\text{ [m}^2]$ é a área da seção de um objeto paralelepípedico feito desse material. $V\text{ [V]}$ é a diferença de potencial e $I\text{ [A]}$ a corrente injetada nas extremidades do objeto, utilizando eletrodos com a mesma seção do objeto.

Para calcular a resistividade elétrica do solo de uma forma não invasiva, Fig. 6.1, são necessárias outras formulações que não a dada por (6.1). Utilizando, por exemplo, o método de Wenner, tem-se que a resistividade elétrica aparente é dada por (2.6).

Em (2.6), R_m é a resistência aparente. Observe que em (6.1) tem-se a resistividade elétrica e que em (2.6) tem-se a resistividade elétrica aparente. O que a maioria dos dispositivos utilizados para medir a condutividade elétrica do solo σ_i faz é utilizando (2.6) mapeiam a condutividade elétrica aparente $\sigma_a(a)$ e observam a sua variação. Há situações em que este mapeamento não permite identificar correctamente a estrutura das camadas do solo, como se verifica no exemplo da Fig. 6.2. Neste exemplo, a

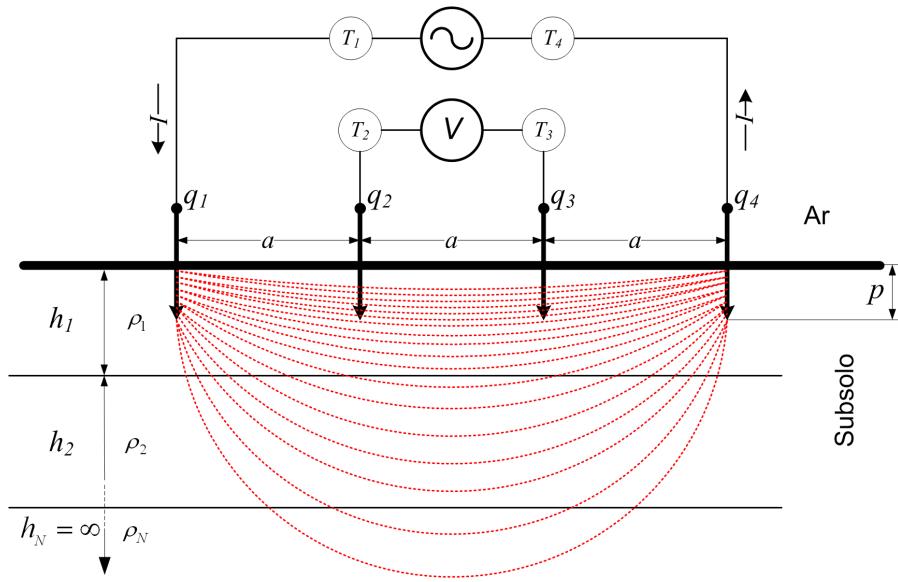


Figura 6.1 - Método de Wenner, utilizado para a estratificação com várias camadas.

condutividade aparente medida à profundidade h_a é igual nos dois casos, Fig. 6.2 (a) e (b). A condutividade aparente medida à profundidade h_b pode ainda ser igual nos dois casos, apesar de serem situações distintas. Só uma estratificação 3D permite identificar as duas situações corretamente.

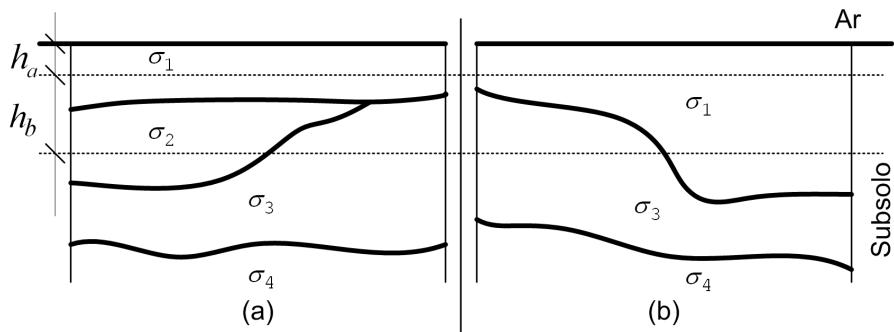


Figura 6.2 - Duas situações em que o simples mapeamento da condutividade aparente a duas profundidades, h_a e h_b , pode dar o mesmo resultado, apesar de serem distintas.

Para calcular a condutividade elétrica do solo σ_i é necessário, após a coleta dos valores da resistividade elétrica aparente $\sigma_a(a)$, utilizar um processo de estratificação. No entanto, a quantidade de dados coletados pelos Dispositivos já existente, não é o suficiente para produzir uma estratificação do solo.

Especificamente, existe um Dispositivo que utiliza disco planos lisos (disco de de cortes) comumente utilizados em máquinas agrícolas como eletrodos que são arrastados pela superfície do solo. Este Dispositivo, apresentado na patente *US 5841282*, possui seis discos que quando arrastados pelo solo, efetuam as medidas de condutividade elétrica do solo georreferenciando-as. No entanto, este Dispositivo não estratifica o solo em camadas tridimensionais, ele apenas mensura a condutividade elétrica aparente na superfície do solo, ou seja, em uma faixa com uma profundidade de no máximo 0.9 m, que para a aplicação da metodologia proposta no Capítulo 4 não é suficiente.

Um segundo Dispositivo e técnica, são apresentados em *US 6138590*, porém, este Dispositivo utiliza produtos químicos na obtenção da resistividade elétrica do solo medida *in situ*. Nos dois métodos anteriores, obtém-se apenas a resistividade e ou condutividade elétrica de uma faixa estreita da superfície do solo. Outra técnica desenvolvida para mapear características físicas dos solos é apresentada em *US 6963205 B2*. Esta técnica é utilizada para medir a umidade do solo nas construções de estradas e fundações utilizando sondagem por rádio freqüência. Embora a técnica seja satisfatória para a aplicação na construção civil, o equipamento tem um custo elevado.

Pelo exposto, justifica-se a construção do Dispositivo objeto da presente proposta, que através de uma máquina de arrasto (trator, caminhonete etc.) possa coletar os dados no campo e convertê-los, utilizando a metodologia proposta, em valores que possam ser utilizados para uma estratificação 3D, tanto nas engenharias supra citadas, quanto em outras áreas onde há a necessidade de conhecer o subsolo e suas características, tentando assim, provocar uma redução nos custos e uma maior precisão em relação aos métodos utilizados.

6.2 Descrição do Dispositivo Proposto

O esquema mecânico do Dispositivo, Fig. 6.3, para utilização do método proposto de estratificação 3D, necessita da utilização de alguns discos de corte (1) adaptado a uma barra porta ferramentas. Estes discos de corte (1) farão o papel dos eletrodos, relacionado ao método de Wenner. Uma base limitadora (2) é adaptada aos discos de corte (1), fazendo com que o disco de corte (1) penetre o solo a uma profundidade fixa, haja vista, que esta profundidade deve suprimir a necessidade de penetração no solo para a aplicação do método, já que a teoria eletromagnética parte do pressuposto que a injeção de corrente é pontual.

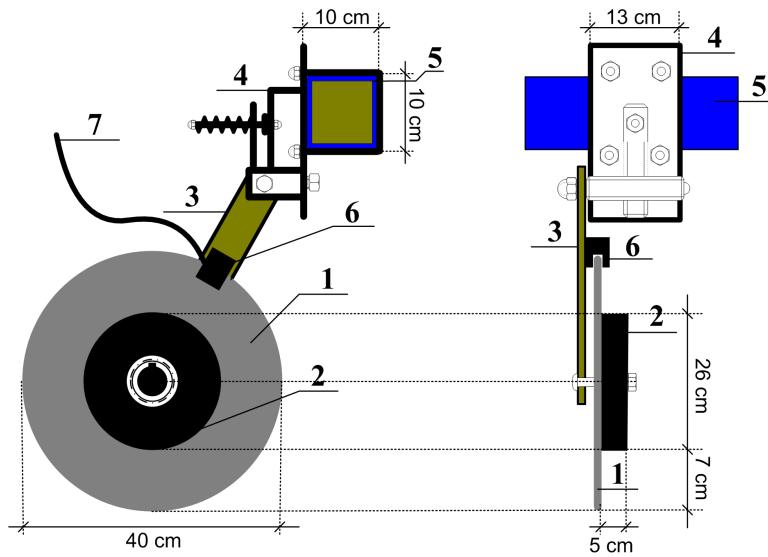


Figura 6.3 - Parte do dispositivo que faz o contato com o solo (eletrodos).

Para que o método de Wenner seja aplicado, é necessário que os discos sejam colocados em uma disposição predefinida, fazendo as distâncias entre os eletrodos serem sempre a . No entanto, estes valores de a podem ser mudados de acordo com a necessidade do usuário. Os discos são presos a uma barra de fixação (3) que é ligada através de solda a uma presilha de conexão (4). Os terminais de contato (6) são conectados a cabos de ligação (7) que servirão para a injeção de corrente elétrica e medição de tensão.

Na Fig. 6.4, as presilhas (4), são parafusadas a uma barra porta ferramenta (5) isolado superficialmente por um material não condutor, como a borracha ou um *PVC glos.*, onde os discos são dispostos de acordo com a necessidade do usuário, ou seja, podendo variar o valor de a numa faixa de $0.2 \text{ m} \leq a \leq 5 \text{ m}$. O terminal de contato (6) é o responsável pela injeção de corrente elétrica nos discos de corte (1).

Para o deslocamento em campo é necessária uma estrutura que conecte o Dispositivo a uma máquina que o arraste, Fig. 6.5. Esta estrutura é formada por duas partes, uma que é conectada ao Dispositivo (8a) e uma outra conectada a máquina de arrasto (8b). A Fig. 6.6 ilustra o Dispositivo conectado à máquina de arrasto (9). Na máquina de arrasto (9), é adaptada uma caixa contendo equipamentos eletrônicos de medidas (8c).

Na Fig. 6.7, apresenta-se a montagem do Dispositivo, onde ao longo da barra porta

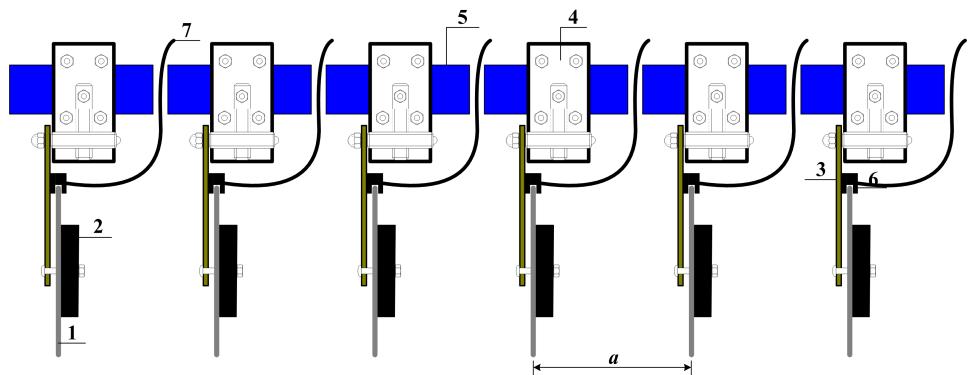


Figura 6.4 - Vista frontal de parte do dispositivo.

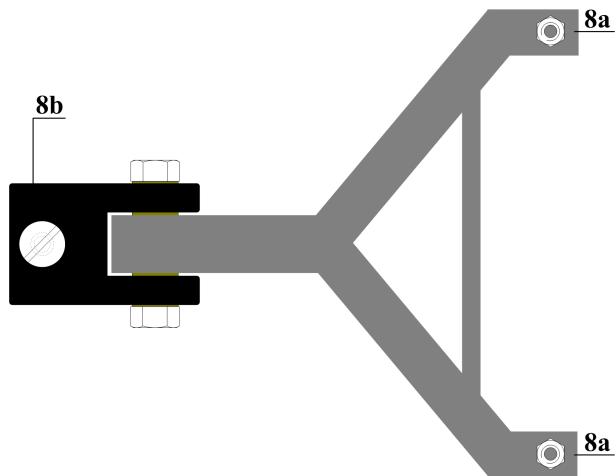


Figura 6.5 - Estrutura que conecta o dispositivo à máquina de arrasto.

ferramenta (5) são colocadas as presilhas de conexão (4) já acopladas com os discos de corte (1), com as bases limitadoras (2), o terminal de contato (6), os cabos de ligação (7) e as barras de fixação (3). Ao final da barra porta ferramenta (5) é colocado o sistema de amortecimento (10) e as rodas com os pneus (11). Após a conexão do Dispositivo a máquina de arrasto (9), são colocados alguns contra pesos (12) para garantir que os discos estejam sempre cravados no solo. Um sistema de molejo fica conectado entre a barra porta ferramenta e os discos de corte, levando os discos a terem certa flexibilidade. Assim, os discos de corte são móveis na direção do arrasto, sendo mantido em suas posições por molas que permitem um movimento no intervalo de 0° a 45°. Desta forma é garantido um contato contínuo de todos os discos com o solo, mesmo quando surgir obstáculos ou acidentes de terreno.

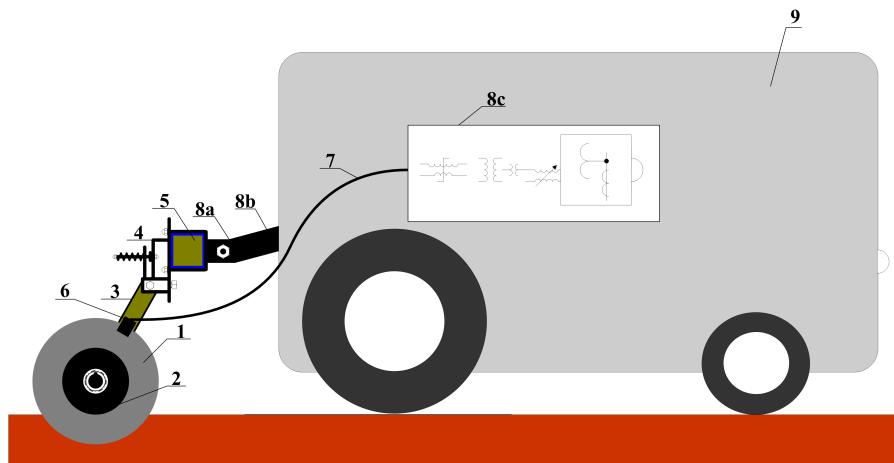


Figura 6.6 - Dispositivo conectado a máquina de arrasto.

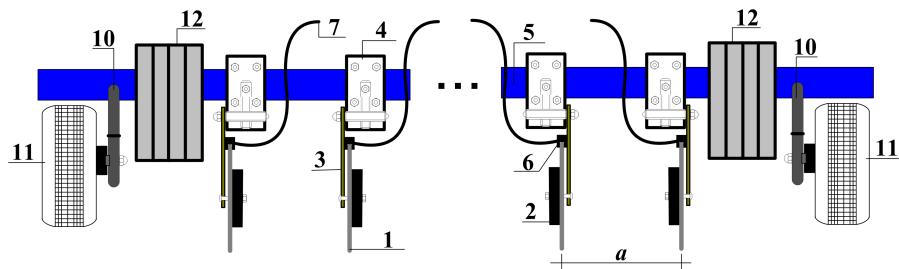


Figura 6.7 - Montagem do dispositivo.

O Dispositivo é produzido em módulos, isto é, define-se um comprimento de utilização para o suporte de metal (5) e posteriormente parafusa-se a ele quantos discos de corte (1) se queira, desde que a quantidade seja par e superior a 12 discos. Agora, o Dispositivo está pronto para ser arrastado pelo campo onde será feita a estratificação 3D. O Dispositivo completo, com todos os seus eletrodos conectados para uma determinada disposição dos discos, é apresentado na Fig. 6.8. Observe que na Fig. 6.8, a assume os seguintes valores 0.3 m, 0.5m, 0.9 m e 1.5 m, que são os mesmos valores utilizados na Seção 5.4.

6.2.1 Aplicação do Método em Conjunto com o Dispositivo

Na Fig. 6.8, q_1, q_2, \dots, q_{12} são os eletrodos conectados aos condutores por onde a corrente elétrica I é injetada e ou a tensão é medida. Portanto, quando uma corrente elétrica I é injetada em q_1 e capturada em q_{12} , a tensão é medida em q_3 e q_{10} . Instantaneamente, o medidor de resistividade elétrica (13), Fig. 6.9, injeta a

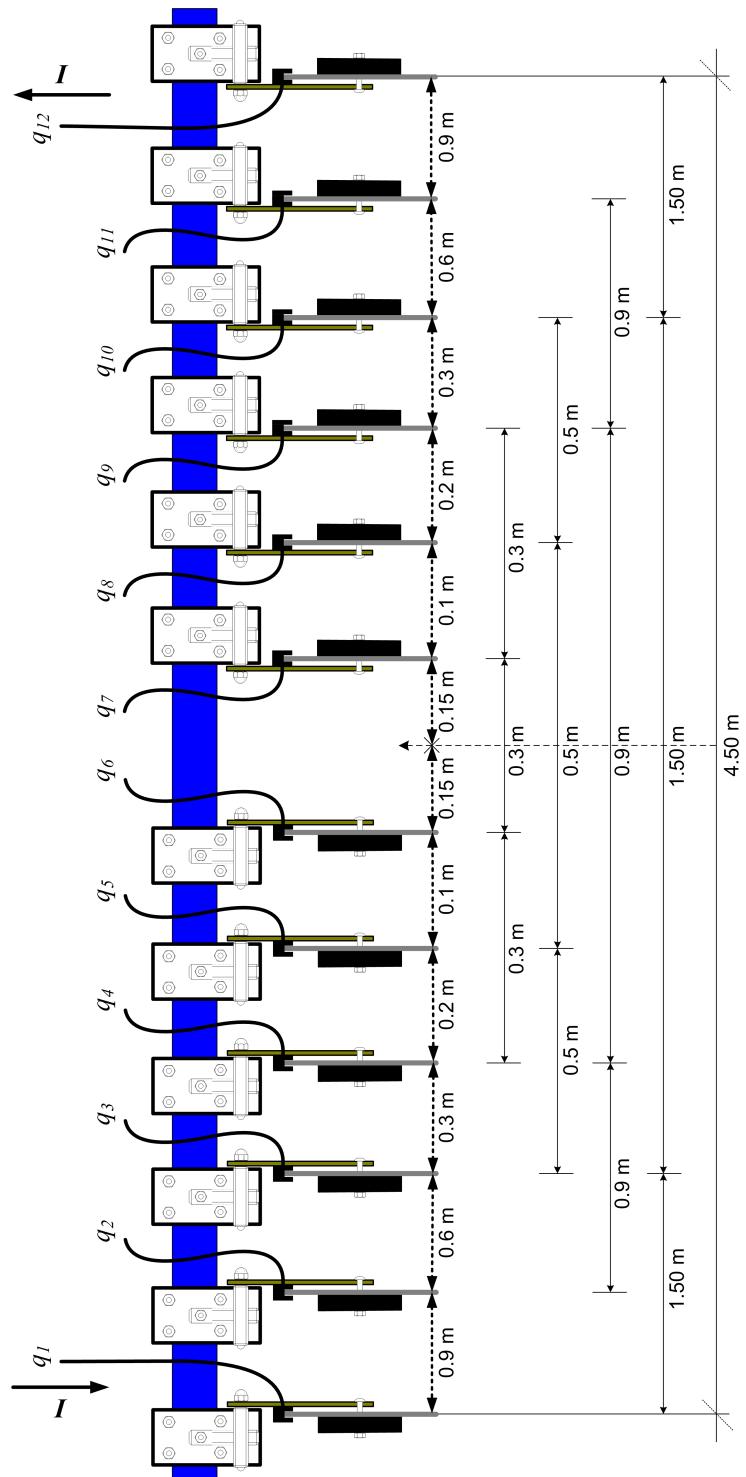


Figura 6.8 - Vista frontal do dispositivo completo.

mesma corrente elétrica I em q_2 e captura em q_{11} , medindo a tensão em q_4 e q_9 . Da mesma forma, a mesma corrente elétrica I é injetada em q_3 e captura em q_{10} ,

medindo a tensão em q_5 e q_8 . E por último, a mesma corrente elétrica I é injetada em q_4 e capturada em q_9 , medindo a diferença de potencial em q_6 e q_7 . Observa-se, que são atribuídas duas funções para a maioria dos discos de cortes (1). Utilizando a configuração da Fig. 6.8, em um determinado tempo t , os condutores em q_3 e q_{10} sob dois eletrodos, são injetores de corrente, noutro tempo $t + 1$, os condutores em q_3 e q_{10} sob os mesmos eletrodos, são medidores de tensão.

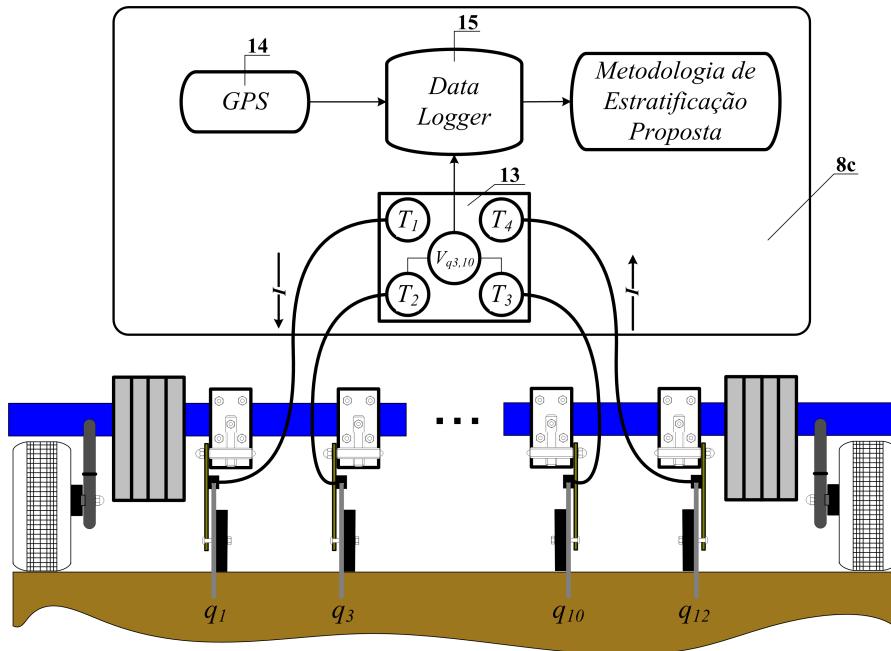


Figura 6.9 - Configuração para captura dos dados.

Se a configuração for diferente da representada na Fig. 6.8, ou seja, a quantidade de discos de cortes (1) e espaçamentos entre eles for diferente, os terminais de contato (6) e os cabos de ligação (7) onde a corrente elétrica é injetada terão suas posições modificadas. Dependendo da quantidade de discos e da distância a entre eles, o suporte de metal (5), Fig. 6.8, terá um determinado comprimento, equivalente a $3 \times$ o maior valor de a .

Para o Dispositivo ser arrastado pelo solo, deve-se definir uma distância mínima entre uma leitura e outra de corrente. Para que fique de acordo com a metodologia proposta, esta distância mínima entre uma leitura e outra de corrente será M , assim as subáreas serão sempre $M \times M$. Portanto, M é o espaço que a máquina de arrasto irá percorrer entre uma medida de tensão e outra. Quanto menor o valor de M ,

melhor a precisão da estratificação, porém, haverá uma quantidade maior de dados a serem analisados.

Toda vez que a corrente I é injetada no solo e o valor de a for máximo, através dos terminais T_1 e T_4 do medidor de resistividade elétrica (13), Fig. 6.9, um *GPS* ^{glos.} (14) informa a localização da leitura da tensão V , que é feita nos terminais T_2 e T_3 do medidor de resistividade elétrica (13). Os dados coletados são armazenados em um *Data Logger* ^{glos.} (15). Portanto os dados armazenados são: a localização da injeção da corrente (latitude, longitude e altitude), a resistividade $\rho_a(a)$ no ponto de injeção de corrente, as distâncias a entre os discos e as distâncias entre as injeções de correntes M , este processo é feito por todo o terreno.

O fluxograma da Fig. 6.10 ilustra a sequência com que os dados são capturados pelo Dispositivo e analisados pela metodologia proposta.

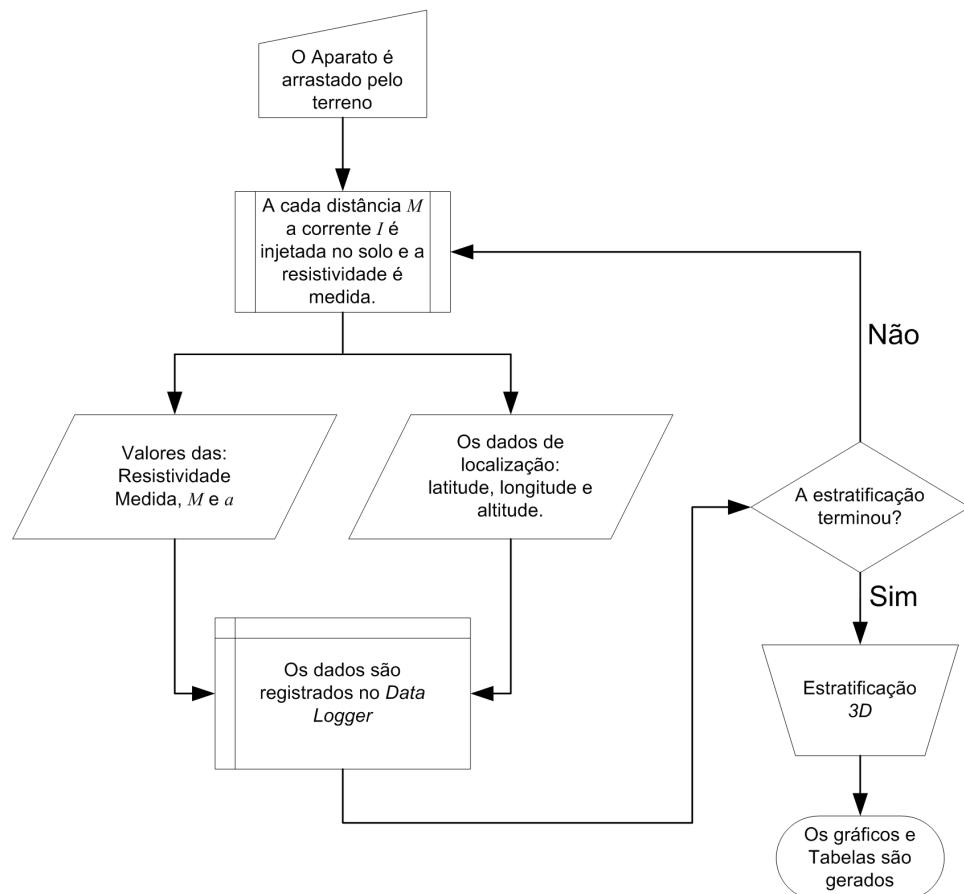


Figura 6.10 - Fluxo de entrada e saída de dados.

Após todos os dados serem analisados e a estratificação *3D* ser produzida, elabora-se tabelas e gráficos onde os resultados possam ser visualizados com apresentados nas Seção 5.4.4.1 e Seção 5.5.3.1. De posse destes resultados, pode-se fazer uma análise específica para cada projeto que deseja ser desenvolvido no local estratificado.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

Durante todo o percurso para o término deste trabalho e, a após o desenvolvimento da modelagem, tanto matemática como computacional, várias áreas foram sendo selecionadas e a estratificação foi sendo realizada. Os métodos foram sendo testados e os resultados comparados. O método de Quase-Newton obteve desvios satisfatórios em relação ao método das Imagens Complexas, no entanto, a precisão alcançada ainda não concedia a segurança para afirmar que o erro que ainda persistia era o erro apenas do comportamento do solo em relação a suas camadas (fato que o solo não tem uniformidade em suas camadas horizontais e paralelas). Entretanto, utilizando, a princípio, o método de Quase-Newton, foi possível otimizar o valor de N e através da modelagem matemática desenvolvida, obter o valor de ρ_1 composto de seus significados físicos e não, como outrora descrito, por extração matemática.

Na tentativa de diminuir ainda mais os desvios encontrados, foi utilizado uma heurística (algoritmo genético). A utilização do algoritmo genético proporcionou uma significativa diminuição nos valores dos desvios em relação ao método de Quase-Newton.

Observando-se os valores nas tabelas referentes as comparações de resultados obtidos em outras fontes bibliográficas com a metodologia proposta (AGCR), pode-se concluir:

- a) Os erros referentes aos valores da primeira camada ficaram praticamente desprezíveis, devido o fato da metodologia proposta levar em consideração os efeitos físicos contidos na curva experimental de resistividade aparente, e não de extrações matemáticas;
- b) A maior parte dos desvios ainda existentes nos resultados obtidos na metodologia proposta corresponde a não adequação do modelo matemático de camadas horizontais a estrutura do solo medido.

Com a utilização da metodologia proposta na obtenção da condutividade elétrica do solo, abre-se espaço para a aplicação do método na agricultura de precisão. Os métodos tradicionais usados para a obtenção dos valores da condutividade elétrica na agricultura produzem uma estimativa apenas da condutividade elétrica aparente em

uma fina massa do solo, enquanto o método proposto estima não só a condutividade elétrica das camadas do solo, mas também suas respectivas profundidades.

Limitações sobre o método proposto podem aparecer com a existência de uma fenda vertical ou oblíqua, isto é suficiente para interferir nos resultados quando se utiliza o método de Wenner. No entanto, com a *discretização* da área total a ser estratificada em subárea, promovendo o que foi intitulado estratificação tridimensional (estratificação 3D) foi eliminado os problemas que ocorrem em relação ao solo se comportar ou não em camadas horizontais, pois, a estratificação 3D pode estimar blocos de rochas, fendas verticais, estratificação oblíqua etc., o que os outros métodos não permitem.

Após a produção da estratificação 3D, pode-se visualizar as camadas do subsolo de uma forma mais precisa e, com isto, desenvolver várias formas de visualizar uma mesma estratificação. A estratificação tridimensional pode ser considerada uma *TC scan* *glos.* do solo estratificado.

Na realização da estratificação 3D aparece um inconveniente que é a grande quantidade de medidas em campo a ser efetuada, deixando o processo oneroso. Porém, na tentativa de facilitar a coleta de dados em campo, propôs-se um dispositivo capaz de promover com certa agilidade a diminuição de tempo e pessoal envolvida no processo de estratificação 3D do solo.

Outra área onde se aplica a estratificação do solo é na construção e pavimentação de estradas, o conhecimento do solo a ser pavimentado reduz os gastos futuros em estragos causados pela erosão. O processo de erosão reúne o efeito das propriedades do solo que regem a velocidade de infiltração da água da chuva e que determinam a resistência à erosão pela água que infiltra no solo e pelo escoamento superficial. Os materiais utilizados nas camadas de base e sub-base de uma estrada devem apresentar certas propriedades físicas e químicas, para que sejam capazes de conferir estabilidade e resistência mecânica aos esforços e cargas a que serão submetidos durante toda a vida útil da estrada. Porém, nem sempre o solo local satisfaz às especificações para sua utilização. Neste caso, conhecendo o solo existente, tem-se a opção de alterar as propriedades deste solo de forma a criar um material capaz de responder às necessidades previstas.

7.1 Contribuições do Trabalho

As contribuições podem assim ser descritas:

- O trabalho partiu da modelagem matemática utilizando o método de Wenner e usando um equacionamento independente do equacionamento para estratificação em duas camadas do solo, modelou um novo equacionamento para estratificar o solo em múltiplas camadas;
- Obteve o cálculo da resistividade da primeira camada ρ_1 , levando em consideração os efeitos físicos contidos na curva experimental de resistividade aparente $\rho_{aE}(a)$, e não de extrapolações matemáticas;
- Descreveu alguns erros e equívocos cometidos na estratificação do solo em N -camadas;
- Delimitou o problema direto e inverso em suas causalidades no processo de estratificação do solo em N -camadas;
- Delineou procedimentos para coletas de dados em campo e apresentou duas metodologia para otimização do processo de estratificação do solo;
- Propôs um operador para auxiliar no desenvolvimento de um Algoritmo Genético com codificação real;
- Desenvolveu uma modelagem da estratificação tridimensional ($3D$);
- Produziu um plano gráfico e descritivo de um Dispositivo para coleta de dados em campo.
- Obteve a seguinte produção bibliográfica:

Artigos em revista:

- a) Parameters Estimation of a Horizontal Multilayer Soil Using Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Calixto, W. P.; Martins Neto, L; Wu, M; Yamanaka, K; da Paz Moreira, E.
- b) Electromagnetic Problems Solving by Conformal Mapping: A Mathematical Operator for Optimization. *Mathematical Problems in Engineering*,

Calixto, W. P; Alvarenga, B; da Mota, J. C; Brito, L. da C; Wu, M; Alves, A. J; Martins Neto, L; Antunes, C. F. R. L.

- c) Three-Dimensional Soil Stratification Methodology for Geoelectrical Prospection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Calixto, W. P; Coimbra, A. P; Alvarenga, B; Martins Neto, L; Molin, J. P.
- d) A Real-Coded Genetic Algorithm with Chromosomal Extrapolation Applied to Geoelectrical Prospecting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Calixto, W. P; Coimbra, A. P; Alvarenga, B; Brito, L. da C; da Mota, J. C; da Silva, W. G; Soares, M. G; Martins Neto, L.
- e) Carter's factor calculation using domain transformations and the finite element method. *International Journal of Numerical Modelling*, Calixto, W. P; Alvarenga, B. P; Coimbra, A. P; Alves, A. J; Martins Neto, L; Wu, M; Silva, W. G; Delbone, E.
- f) Horizontal Stratification of the Soil in Multi-Layer Using Non-Linear Optimization. *Revista de Ciências Exatas e Naturais*, Calixto, W. P; Martins Neto, L; Wu, M; Machado Filho, H. B.
- g) Calculation of soil electrical conductivity using a genetic algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*, Calixto, W. P; Martins Neto, L; Wu, M; Kliemann, H. J; de Castro, S. S; Yamanaka, K.
- h) New Method and Device for 3D Mapping of Soil Electrical Conductivity Applied Geoprospecting. *Computers and Electronics in Agriculture*, Calixto, W. P; Molin, J. P; Kliemann, H. J; Coimbra, A. P; da Silva, W. G; Alvarenga, B; Martins Neto, L.

Artigos em congresso:

- a) Genetic Algorithm Applied in a Geoelectrical Prospecting Method. *IEEE PES - 9^a International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Calixto, W. P; Martins Neto, L; Wu, M; Yamanaka, K; Machado Filho, H. B.
- b) Methodology for Tridimensional Soil Stratification. *IEEE/PEITS - 3rd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation*

System , Calixto, W. P; de Sá, A. A. R. de; Antunes, C. F. R. L; Wu, M; Cardoso, A; Alves, A. J; Martins Neto, L.

- c) Algoritmo Genético Aplicado a um Método de Prospecção Geoelétrico. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE. Calixto, W. P; Martins Neto, L; Wu, M; Machado Filho, H. B; Yamanaka, K.
- d) Obtenção da Condutividade Elétrica do Solo e suas Respectivas Espessuras Utilizando Heurística Moderna. Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão - ConBap, Calixto, W. P; Martins Neto, L; Wu, M; Alves, A. J; Kliemann, H. J.

Patentes e Registros:

- a) Aterra - Software de Estratificação do Solo. Calixto, W. P; Martins Neto, L.
- b) Stratum - Aparato para Estratificação do Solo em Camadas Tridimensionais. Calixto, W. P; Martins Neto, L.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- a) Utilização de programação com números inteiros no AGCR;
- b) Reconhecimento de padrão da matriz de melhor indivíduo do AGCR utilizando redes neurais;
- c) Comparar os problemas de otimização das curvas de resistividades aparentes experimental e teórica com problema matemático de aproximação funcional;

ANEXO A

ROTINA DO ALGORITMO DE SUNDE

Abaixo o desenvolvimento do Algoritmo de Sunde na linguagem utilizada pelo software MatLab®.

```
function [PopFx,fx1] = SundeAlgPac(PopIn,N,a,R0a,Passo)
%Função que determina a curva teórica de resistividade experimental tendo
%como dado de entrada as distâncias entre as hastes "a", as resistividades
%de cada camada "R0a" e as espessuras de cada camada "hi".
%Produzido por: Wesley Pacheco Calixto, Luciano Martins Neto - Maio de 2009,
%Universidade de Coimbra - Portugal
%*****Dados Manipulados*****
PopIn = abs(PopIn);
D = a;%valores das distancias entre as hastes em metros
d = D(1):Passo:D(end);
Fx = [];
CurveTeor = [];
CurveExpe = [];
Error = [];
for ia = 1:size(PopIn,1)
p = (PopIn(ia,[1:N])); %layers resistivity
h = (PopIn(ia,N+1:end));%layers thickness
%*****Inicio do Algoritmo de Sunde*****
%*****Determinação dos valores E1*****
for a = 1:size(d,2)
e(a) = a/size(d,2);
end
%*****Determinação do termo independente nb*****
for a = 1:N-1
k(a) = (p(a+1) - p(a))/(p(a+1) + p(a));
end
for a = 1:size(d,2)
arg1 = e(a);
arg2 = h(N-1)/h(1);
f(N-1) = (1 + k(N-1)*(arg1^arg2))/(1 - k(N-1)*(arg1^arg2));
end
```

```

for b = 1:N-2
kl(N-1-b) = (1 - k(N-1-b) - f(N-b)*(1 + k(N-1-b)))/(1 - k(N-1-b) +
f(N-b)*(1 + k(N-1-b)));
r(N-1-b) = h(N-1-b)/h(1);
f(N-1-b) = (1 - kl(N-1-b)*(arg1\r(r(N-1-b)))/(1 + kl(N-1-b)*(arg1\r(N-
1-b)));
end
a3(a,1) = f(1) - 1;
end
%*****Determinação da matriz E1*****
for a = 1:size(d,2)
for b = 1:size(d,2)
e1(a,b) = e(a)\b;
end
end
matE1 = e1;
%*****Determinação de X*****
x40 = matE1 \ a3;
%*****Calculo da resistividade aparente teorica*****
for a = 1:size(d,2)
hh = h(1)/d(a);
ra1 = Passo;
for b = 1:size(d,2)
rr(b) = x40(b,1)*((1/sqrt(4*hh*hh*b*b+1)) - (1/(2*sqrt(hh*hh*b*b+1))));
ra1 = ra1 + rr(b);
end
ra2(a) = 2*ra1;
ppa(a) = p(1)*ra2(a);
end
for ia = 1:size(d,2)
for ib = 1:size(D,2)
if d(ia) == D(ib)
Dd(ib) = ia;
end
end
end

```

```

dx = D(1):Passo:D(end);
PPA = ppa(Dd);
TT = interp1(D, PPA,dx,'spline');
EE = interp1(D, R0a,dx,'spline');
%*****Function Evaluation*****
for ib = 1:size(R0a,2)
fx1(ib) = ((R0a(ib) - PPA(ib))/(R0a(ib)))*100;
end
fx2 = sum(abs(fx1));
Fx(end+1,1) = fx2;
CurveTeor(end+1,:) = PPA;
CurveExpe(end+1,:) = R0a;
Error(end+1,:) = fx1;
%*****Graficos*****
figure(1); grid on; subplot(2,3,1);
plot(dx,TT,'k-','LineWidth', 1.5);
hold on; title('Curva de Resistividade Experimental & Teórica');
xlabel('a [m]'); ylabel('R0(a) [Ohm x m]')
plot(dx,EE,'r-','LineWidth', 1.5);
plot(D,PPA,'go','LineWidth', 2);
plot(D,R0a,'bo','LineWidth', 2);
hold off;
end
PopFx = [Fx PopIn];

```


REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARENALES, S.; DAREZZO, A. **Cálculo Numérico**. 1. ed. Brasil: Thomson, 2008. [59](#), [77](#)
- BANTON, O.; SEGUIN, M. K.; CIMON, M. A. **Mapping Field-Scale Physical Properties of Soil with Electrical Resistivity**. 1. ed. SSSAJ: Soil Science Societies American Journal, v. 61, 1997. [32](#)
- BASSOI, L. H.; FANTE JÚNIOR, L.; JORGE, L. A. C.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. **Distribution of Maize Root System in a Kanduidalfic Eutrudox Soil: II. Comparison between Irrigated and Fertirrigated Crops**. 1. ed. [S.l.]: Scientia Agricola, vol.51, n.3, p. 541-548, 1994. [33](#)
- BÄCK, T. **Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies Evolutionary Programming Genetic Algorithms**. 1. ed. Oxford, GBR: Oxford University Press, 1996. [66](#)
- BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z. **Evolutionary Computation**. 1. ed. Philadelphia, USA: Institute of Physics Publishing, 2000. [66](#)
- BESSON, A.; COUSIN, I.; SAMOUËLIAN, A.; BOIZARD, H.; RICHARD, G. **Structural Heterogeneity of the tilled layer as Characterized by 2D electrical resistivity Surveying**. 1. ed. [S.l.]: Soil & Tillage Reserch, vol.79, 239-249, 2004. [33](#)
- BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Series: Ecological studies v. 33. [S.l.]: Springer-Verlag, Berlin, 1979. [33](#)
- BOOR, C. D. **A practical guide to splines**. 1. ed. [S.l.]: Springer-Verlag, New York, 2001. [72](#)
- CALIXTO, W. P.; ALVARENGA, B. P.; MOTA, J. C.; BRITO, L. C.; WU, M.; ALVES, A. J.; MARTINS NETO, L.; ANTUNES, C. F. L. R. **Electromagnetic Problems Solving by Conformal Mapping - A Mathematical Operator for Optimization**. 1. ed. [S.l.]: Mathematical Problems in Engineering. vol. 2010, 2010. [63](#), [64](#), [65](#), [68](#)
- CALIXTO, W. P.; MARTINS NETO, L.; WU, M.; MACHADO FILHO, H. B. **Horizontal Stratification of the Soil in Multi-Layer Using Non-Linear Optimization**. 1. ed. RECEN: Revista Ciências Exatas e Naturais, v. 11, 2009. [63](#)

CALIXTO, W. P.; MARTINS NETO, L.; WU, M.; KLIEMANN, H. J.; CASTRO, S. S.; YAMANAKA, K. **Calculation of Soil Electrical Conductivity Using a Genetic Algorithm.** 1. ed. CEA: Computers and Electronics in Agriculture, v. 71, 2010. [31](#), [33](#), [87](#), [108](#)

CALIXTO, W. P.; MARTINS NETO, L.; WU, M.; YAMANAKA, K. **Parameters Estimation of a Horizontal Multilayer Soil Using Genetic Algorithm.** 1. ed. IEEE: Transactions on Power Delivery, 2010. [31](#), [32](#), [37](#), [51](#), [78](#), [87](#), [102](#), [123](#)

CANADELL, J.; JACKSON, R. B.; EHLERINGER, J. R.; MOONEY, H. A.; SALA, O. E.; SCHULZE, E. D. **Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale.** 1. ed. [S.l.]: Springer Oecologia, vol.108 no.4 p. 583-595, 1996. [33](#)

CHOW, Y. L.; YANG, J. J.; SRIVASTAVA, K. D. **Complex Images of a Ground Electrode in Layered Soil.** 1. ed. JAP: Journal of Applied Physics, v. 71, 569-574, 1992. [59](#)

COELHO, E. F.; OR, D. **Root Distribution and Water Uptake Patterns of Corn Under Surface and Subsurface Drip Irrigation.** 1. ed. [S.l.]: Plant and Soil, Dordrecht, vol.206, p.123-136, 1999. [33](#)

COLLINS, R. E. **Mathematical Methods for Physicists and Engineers.** 1. ed. [S.l.]: over Publications, New York, 2 ed., 1999. [72](#), [73](#)

DAWALIBI, F.; BLATTNER, C. J. **Earth Resistivity Measurement Interpretation Techniques.** 1. ed. [S.l.]: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-103 no.2, 374-382, 1984. [111](#)

del ALAMO, J. L. **A Second Order Gradient Technique for an Improved Estimation of Soil Parameters in a Two-Layer Earth.** 1. ed. [S.l.]: IEEE Transactions on Power Delivery, vol.6 no.3, 1166-1170, 1991. [113](#), [114](#)

_____. **A Comparison among Eight Different Techniques to Achieve an Optimum Estimation of Electrical Grounding Parameters in Two-Layered Earth.** 1. ed. [S.l.]: IEEE Transactions on Power Delivery, vol.8 no.4, 1890-1899, 1993. [116](#)

DENNIS, J. E.; SCHNABEL, R. **Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations.** 1. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1983. [60](#)

- DIXON, J. B.; SCHULZE, D. G. **Soil Mineralogy with Environmental Applications**. 1. ed. [S.l.]: Soil Science Society of America, 2002. [134](#), [137](#)
- EISENREICH, E. L. end M. **Electrical Conductivity Mapping for Precision Agriculture**. Proceedings. Montpellier, Ecole National Supérieure Agronomique: European Conference on Precision Agriculture, v. 3, 2001. [33](#)
- EMBRAPA. **Criteria for distinction of soil types and stages of mapping units: standards in use by SNLCS**. 1. ed. [S.l.]: National Service of Soil Survey and Conservation - SNLCS, Rio de Janeiro, 1988. [133](#)
- _____. **Brazilian Soil Classification System - SiBCS**. 1. ed. [S.l.]: Embrapa-SPI, Rio de Janeiro, 2006. [20](#), [133](#), [136](#), [138](#)
- FAO. **The State of Food and Agriculture**. 1. ed. [S.l.]: David Lubin Memorial Library Cataloguing in Publication Data, n.31, 1998. [33](#)
- FOX, R. L.; LIPPS, R. C. **Distribution and Activity of Roots in Relation to Soil Properties**. 1. ed. [S.l.]: Transaction 7th International Congress of Soil Science, Madison III, p.260-267, 1960. [33](#)
- FREELAND, R. S. **Review of Soil Moisture Sensing Using Soil Electrical Conductivity**. 1. ed. ASAE: Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, v. 32 n° 6, 1989. [31](#)
- FRITSCH, F. N.; CARLSON, R. E. **Monotone Piecewise Cubic Interpolation**. 1. ed. [S.l.]: SIAM J. Numerical Analysis, vol.17, 238-246, 1980. [72](#)
- GEBBERS, R.; LÜCK, E.; DABAS, M.; DOMSCH, H. A. **Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale**. 1. ed. [S.l.]: Near Surface Geophysics, 179-190, 2009. [33](#)
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, optimization, and Machine Learning**. 1. ed. New York: Addison-Wesley, 1989. [66](#)
- GONOS, I. F.; STATHOPULOS, I. A. **Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithms**. 1. ed. IEEE: Transactions on Power Delivery, v. 20 n° 1, 2005. [108](#), [110](#), [117](#)
- GRIFFITHS, D. H.; KING, R. F. **Applied Geophysics for Engineers and Geologists: The Elements of Geophysical Prospecting**. 1. ed. Oxford, GBR: Pergamon Press, 1981. [37](#)

HERRERA, F.; LOZANO, M.; SÁNCHEZ, A. M. **Algoritmos Genéticos con Codificación Real: Operadores de Cruce Híbridos Basados em Entornos ter Múltiples Descendientes**. 1. ed. IJIS: International Journal of Intelligent Systems, 2003. [67](#)

HERRERA, F.; LOZANO, M.; VERDEGAY, J. L. **Tackling Real-Coded Genetic Algorithms: Operators and Tools for Behavioural Analysis**. 1. ed. [S.l.]: Artificial Intelligence Review. vol. 12, 265-319, 1998. [64](#), [75](#)

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. 1. ed. London: The University of Michigan Press (The MIT Press 1992), 1975. [65](#)

IEEE Std 142. **Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems**. 1. ed. Houston, Texas: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1991. [33](#), [38](#), [41](#)

IEEE Std 81. **Guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system**. 1. ed. Houston, Texas: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983. [33](#)

KIRSCH, A. **An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems Applied Mathematical Sciences**. 1. ed. New York: Springer-Verlag, 1996. [52](#)

LAGACÉ, P. J.; FORTIN, J.; CRAINIC, E. D. **Interpretation of Resistivity Sounding Measurements in N-Layer Soil using Electrostatic Images**. 1. ed. [S.l.]: IEEE Transactions on Power Delivery, vol.11 no.3, 1349-1354, 1996. [113](#), [114](#)

LÜCK, E.; EISENREICH, M. **Electrical Conductivity Mapping for Precision Agriculture**. 1. ed. Montpellier, Ecole National Supérieure Agronomique: Proceedings, European Conference on Precision Agriculture, 2001. [75](#), [102](#)

LIMA, F. R. S. **Modelagem Tridimensional de Problemas Inversos em Condução de Calor: Aplicação em Problemas de Usinagem**. Tese de Doutorado. 1. ed. Uberlândia, Brasil: Universidade Federal de Uberlândia, 2001. [52](#)

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional.** 1. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Ed. Brasport, 2006. 63, 66, 75

LUND, E. D.; COLIN, P. E.; CHRISTY, D.; DRUMMOND, P. E. **Applying Soil Electrical Conductivity Technology to Precision Agriculture.** Proceedings. Saint Paul: ASA/CSSA/SSSA, 1998. 31

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G.; MADARI, B. E.; MEIRELLES, M. S. P. **Mapeamento da Condutividade Elétrica e Relação com a Argila de Latossolo sob Plantio Direto.** 1. ed. Brasília, Brasil: Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 41, n° 6, 2006. 31

McCULLEY, R.; JOBBÁGY, E.; POCKMAN, W.; JACKSON, R. **Nutrient Uptake as a Contributing Explanation for Deep Rooting in Arid and Semi-arid Ecosystems.** 1. ed. [S.l.]: Springer Oecologia, vol.141, no.4 p.620-628, 2004. 33

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs.** 1. ed. Charlotte, North Carolina, USA: Ed. Springer, 1992. 67, 68

MICHALEWICZ, Z.; FOGEL, D. B. **How to Solve it: Modern Heuristics.** 1. ed. Berlin, Germany: Ed. Springer, 1999. 63, 75

MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER, J. **Mensuração da Condutividade Elétrica do Solo por Indução e sua Correlação com Fatores de Produção.** 1. ed. Jaboticabal, Brazil: Engenharia Agrícola, v. 25 n° 2, 2005. 31, 32

NADLER, A.; FRENKEL., H. **Determination of Soil Solution Electrical Conductivity from Bulk Soil Electrical Conductivity Measurements by the four electrode method.** 1. ed. SSAJ: Soil Science of American Journal, v. 44 n° 5, 1980. 31

NBR 7117. **Medição da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos.** 1. ed. Norma Brasileira de Regulamentação: ABNT, 1981. 41, 55, 56, 58, 97, 101

NEDJAH, N.; ABRAHAM, A.; MOURELLE, L. M. **Genetic Systems Programming Theory and Experiences**. 1. ed. Berlin, DEU: Ed. Springer, 2006. [65](#)

NEITTAANMÄKI, P.; RUDNICKI, M.; SAVINI, A. **Inverse Problems and Optimal Design in Electricity and Magnetism**. 1. ed. New York: Oxford Science Publication, 1996. [52](#)

NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. **Numerical Optimization, Springer Series in Operations Research**. 1. ed. New York: Springer, 1999. [61](#), [62](#)

ORELLANA, E. **Prospección Geoelectrica en Corriente Continua**. 1. ed. Madrid: Paraninfo, 1974. [34](#), [45](#), [46](#)

PEREIRA FILHO, M. L.; CARDOSO, J. R. **Avaliação de Desempenho de Malhas de Terra Usando Imagens Complexas: Uma Nova Abordagem**. 1. ed. Brasil: SBA Controle & Automação vol. 12 no. 03, 2001. [59](#)

PIRSON, S. J. **Geologic Well Log Analysis**. 1. ed. Houston, Texas: Gulf Publishing Co, 1963. [41](#)

POWELL, M. J. D. **The Convergence of Variable Metric Methods for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations**. 1. ed. London: Academic Press, 1978. [62](#)

RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJIK, F. **Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates**. 1. ed. [S.l.]: Soil & Tillage Research 54 (3-4), 145-153 (Elsevier), 2005. [58](#)

REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicação**. 1. ed. Barueri, São Paulo, Brasil: Ed. Manole, 2005. [65](#)

RHOADES, J. D.; INGVALSON, R. D. **Determining Salinity in Soils with Soil Resistance Measurements**. Proceedings. SSAP: Soil Science of American Proceedings, v. 35, 1971. [32](#), [58](#)

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. **Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais**. 1. ed. Brasil: Makron Books, 2006. [60](#), [77](#)

SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. **Applied Geophysics**. 1. ed. [S.l.]: Soil & Tillage Reserch, vol.83, 173-193, 2005. 33

SCHUMAKER, L. L. **Spline Functions: Basic Theory**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge Mathematical Library, 2007. 72

SÉGER, M.; COUSIN, I.; FRISON, A.; BOIZARD, H.; RICHARD, G. **Characterization of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements**. 1. ed. [S.l.]: Soil & Tillage Reserch, vol.103 387-398, 2009. 33

SILVA, S.; WHITFORD, W. G.; JARRELL, W. M.; VIRGINIA, R. A. **The Microarthropod Fauna Associated with a Deep Rooted Legume, Prosopis Glandulosa, in the Chihuahuan Desert**. 1. ed. [S.l.]: Biology and Fertility of Soils, vol.7 p. 330-335, 1989. 33

SLAVICH, P. G.; PETTERSON, G. H. **Estimating the Electrical Conductivity of Saturated Paste Extracts From 1:5 Soil: Water Suspensions and Texture**. 1. ed. Houston, Texas: Australian Journal of Agricultural Research, v. 31, 1993. 102

SOIL SURVEY STAFF. **Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys**. 1. ed. [S.l.]: Washington DC: U.S. Government Printing Office, 1999. 20, 132, 133, 136, 138

SRINIVASAN, A. **Handbook of Precision Agriculture: Principles and Applications**. 1. ed. New York: The Haworth Press Inc., 2006. 32

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R.; WIEBOLD, W. J.; BATCHELOR, W. D.; BOLLERO, G. A.; BULLOCK, D. G.; CLAY, D. E.; PALM, H. L.; PIERCE, F. J.; SCHULER, R. T.; THELEN, K. D. **Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the North-Central USA**. 1. ed. [S.l.]: Computers and Electronics in Agriculture 46 (1-3), 263-283 (Elsevier), 2005. 58

SUNDE, E. D. **Earth conduction effects in transmission systems**. 1. ed. New Cork: MacMilan, 1968. 46

TABBAGH, A.; DABAS, M.; HESSE, A.; PANISSOD, C. **Soil resistivity: A Non-invasive Tool to Map Soil Structure Horizontal**. 1. ed. [S.l.]: Geoderma, vol.97, 393-404, 2000. 31

- TAGG, G. F. **Earth Resistances**. 1. ed. [S.l.]: George Newnes, London, 1964. [32](#)
- WELTNER, K.; GROSJEAN, J.; WEBER, W. J.; SCHUSTER, P. **Mathematics for Physicists and Engineers: Fundamentals and Interactive Study Guide**. 1. ed. Berlim: Springer-Verlag, 2009. [78](#)
- WENNER, F. A. **Method of Measuring Earth Resistivity**. 1. ed. Washington D.C.: Bulletin of the National Bureau of Standards, v. 12, 1916. [34](#), [37](#), [40](#)
- WIERSUM, L. K. **Potential Subsoil Utilization by Roots**. 1. ed. [S.l.]: Plant and soil, vol.27, n.3, p.383-400, 1967. [33](#)
- YANG, J. J.; CHOW, Y. L.; HOWARD, G. E.; FANG, D. G. **Complex Images of an Electric Dipole in Homogeneous and Layered Dielectrics Between Two Ground Planes**. 1. ed. IEEE: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v. 40, n° 3, 595-600, 1992. [59](#)

GLOSSÁRIO

Condutivímetro - é um medidor digital portátil que mensura a condutividade elétrica do solo diretamente *"in loco"*.

Data Logger - é um coletor de dados também chamado de datalogger ou gravador de dados. É um dispositivo eletrônico que registra os dados ao longo do tempo ou em relação a uma localização, construído com sensores externos. São baseados em um processador digital com memórias internas para armazenamento de dados. São de uso geral para uma gama de aplicações em dispositivos de medição específicos, podem ser programáveis.

GPS - é um sistema de navegação por satélite que fornece a um aparelho receptor móvel a posição do mesmo, assim como informação horária, sob todas quaisquer condições atmosféricas, a qualquer momento e em qualquer lugar na Terra, desde que o receptor se encontre no campo de visão de quatro satélites GPS.

Neossolo Regolítico - são tipos de solos que apresentam textura arenosa e baixa capacidade de adsorção de nutrientes, quando comparado com solos argilosos, possui baixo teor de matéria orgânica e nitrogênio que diminuem, após alguns anos de uso agrícola.

Nitossolo Vermelho - são solos minerais, não-hidromórficos, apresentando cor vermelho-escura tendendo à arroxeadas. São derivados do intemperismo de rochas básicas e ultrabásicas, ricas em minerais ferromagnesianos. Uma característica peculiar é que esses solos, como os Latossolos Roxos, apresentam materiais que são atraídos pelo imã. Seus teores de ferro (Fe_2O_3) são elevados (superiores a 15%).

Plintossolo Pétrico Concrecionário - são solos que ocorrem em áreas baixas e nas bordas das chapadas, constituindo geralmente por solos pobres em nutrientes. A origem de concreções ferruginosas nos solos tem sido atribuída, de forma generalizada, às condições de variações sazonais do lençol freático. Este, inicialmente elevado, propicia a redução do ferro com a sua retirada parcial do sistema, mobilização, transporte e concentração. Posteriormente, em épocas secas, a oxidação forma plintitas constituídas por mistura de argila pobre em C orgânico e rica em ferro e alumínio, segregada sob a forma de manchas vermelhas, que com a retirada do lençol freático, apresentam endurecimento constituindo concreções ferruginosas ou petroplintitas.

PVC - é feito a partir de repetidos processos de polimerização que convertem hidrocarbonetos, contidos em materiais como o petróleo, em um único composto

chamado polímero. O vinil é formado basicamente por etileno e cloro. Por uma reação química, o etileno e o cloro combinam-se formando o dicloreto de etileno, que por sua vez é transformado em um gás chamado *VCM* (Vinyl chloride monomer, em português cloreto de vinila). O passo final é a polimerização, que converte o monómero num polímero de vinil, que é o *PVC*, ou simplesmente vinil, contém, em peso, 57% de cloro (derivado do cloreto de sódio - sal de cozinha) e 43% de eteno (derivado do petróleo).

TC scan - é uma tomografia computadorizada (*TC*), originalmente apelidada tomografia axial computadorizada (*TAC*), é um exame complementar de diagnóstico por imagens tridimensionais, que consiste numa representação de uma secção ou fatia do estudo. É obtida através do processamento por computador de informação recolhida após expor o objeto estudado a uma sucessão de raios *X*. Seu método principal é estudar a atenuação de um feixe de raios *X* durante seu trajeto através de um segmento do objeto estudado; no entanto, ela se distingue da radiografia convencional em diversos elementos.

ÍNDICE

- agricultura de precisão, 102, 121, 145, 155
algoritmo genético, 34, 63–68, 74, 75, 81, 88, 98, 101, 155
aptidão, fitness, 65, 66, 74
cromossomo, 64–67
Data Logger, 153
Dispositivo, 145, 147–150, 152, 153
eletrodos, 37–39, 49, 57, 58
elitismo, 66
função de avaliação, 58, 59, 62, 65, 66, 74
genes, 67, 68
GPS, 132
heterogeneidade, 31
homogeneidade, 31, 38
imagens complexas, 35, 58, 59, 85–88, 155, 170
método gráfico, 40
mutação, 67, 74
Pirson, 41
população inicial, 64, 65
Quase-Newton, 34, 59, 60, 62, 63, 81, 88, 155
recombinação, cruzamento, 67, 73, 74
Schlumberger, 34
seleção, 66, 73, 74
Sunde, 45–49, 51, 53, 66
taxa, 73, 74
TC scan, 130, 156
Wenner, 34, 35, 37, 40, 46, 55, 56
Yokogawa, 41