

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEOE33 – TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO II

# O MÉTODO MISE-À-LA-MASSE: ESTUDOS DE CASO DA LITERATURA

EVERALDO BARROS XAVIER

SALVADOR – BAHIA JULHO – 2022

#### O Método Mise-à-la-masse: Estudos de Caso da Literatura

por

EVERALDO BARROS XAVIER

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Susana Silva Cavalcanti

### GEOE33 – TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO II

Departamento de Geofísica

DO

Instituto de Geociências

DA

Universidade Federal da Bahia

Susa	na Silva Cavalconte
Kália	Refame F. do Nascimento
	Aparalo
	M

Comissão Examinadora

Dr<sup>a</sup>. Susana Silva Cavalcanti

Dr<sup>a</sup>. Kátia Rejane Freitas do Nascimento

Dr. Marcos Alberto Rodrigues Vasconcelos

Data da aprovação: 15/07/2022

Para ser grande, sê inteiro: nada Teu exagera ou exclui. Sê todo em cada coisa. Põe quanto és No mínimo que fazes. Assim em cada lago a lua toda Brilha, porque alta vive. **- Fernando Pessoa** 

## Resumo

Com o propósito de realizar uma revisão da literatura sobre o método mise-à-la-masse, foram apresentadas as definições, aplicações e metodologia dos métodos elétricos geofísicos, particularmente, o método mise-à-la-masse. Após a apresentação dos conceitos necessários à compreensão do método de estudo, onze artigos distintos foram analisados, cada qual retratando aplicações distintas do método mise-à-la-masse. Desta forma, foi possível verificar as aplicações conhecidas do método, bem como a sua evolução no decorrer dos anos, além da notória amplitude de possibilidades para futuras aplicações do mesmo.

### Abstract

In order to carry out a review of the literature about the mise-à-la-masse method, the definitions, applications and methodology of geophysical electrical methods were presented, particularly the mise-à-la-masse method. After presenting the concepts necessary to understand the study method, eleven different articles were analyzed, each one portraying different applications of the mise-à-la-masse method. In this way, it was possible to verify the possible applications of the method, as well as its evolution over the years, in addition to the notorious range of possibilities for future applications of the same. Thus, it was possible to analyze the known applications of the method, as well as its evolution over the years, besides the noticeable range of possibilities for future applications of the mise-à-la-masse.

## Sumário

R	esum	0	3
A	bstra	ct	4
In	introdução		15
1	Os I	Métodos Elétricos	17
	1.1	Eletrorresistividade	17
		1.1.1 Arranjos	21
		1.1.2 Técnicas	23
	1.2	Potencial Espontâneo	25
	1.3	Polarização Induzida	27
	1.4	O Método Mise-à-la-masse	28
<b>2</b>	Estı	idos de Casos na Literatura	31
	2.1	Utilização do Método Mise-à-la-masse em um depósito de chumbo, zinco e	
		cobre	31
	2.2	Aplicação do método mise-à-la-masse no mapeamento de um corpo de sulfeto	44
	2.3	Delineação de uma pluma de contaminação em água subterrânea	51
	2.4	Detecção de poluição originada de vazamento de esgoto	58
	2.5	Delineação da migração de um traçador em um basalto parcialmente saturado	66
	2.6	Estabelecimento da extensão lateral de fraturas em rochas	71
	2.7	Rastreamento do fluxo de água subterrânea	79
	2.8	Modelagem e inversão 3D do método mise-à-la-masse em um poço revestido	
		de aço	90
	2.9	Caracterização de um aterro sanitário	96
	2.10	Detecção do vazamento em reservatórios de água	106
	2.11	Monitoramento no tempo da absorção de água pelas raízes em um vinhedo $% \mathcal{A}$ .	115
	2.12	Resumo dos artigos	122

Conclusão	124
Agradecimentos	126
Referências	128

# Lista de Figuras

Faixa de Variação de resistividade elétrica para algumas rochas, solos e miné-	
rios comuns (Lowrie, 2007) $\ldots$	18
Linhas de Campo Elétrico e Superfícies equipotenciais a partir de um único	
eletrodo em um semi-espaço homogêneo. Adaptada de (Lowrie, 2007) $\ .$	20
Configuração com quatro eletrodos (Lowrie, 2007) $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	20
Posicionamento dos eletrodos nos quatro arranjos. Adaptada de (Sato, 2002)	21
Medidas de resistividade aparente com o aumento da distância entre os ele-	
trodos, o que leva a um aumento na profundidade de penetração da corrente	
elétrica (Kirsch, 2006) $\ldots \ldots \ldots$	24
Variação da resistividade aparente sobre 3 camadas horizontais (Kearey, Hill	
e Brooks, 2009)	25
Técnica do Caminhamento Elétrico utilizando um arranjo Dipolo-Dipolo (Braga,	
$2016) \ldots \ldots$	25
O mecanismo das anomalias de potencial espontâneo (Kearey, Hill e Brooks,	
2009)	26
(a)Ilustração do decaimento do potencial. (b) Efeito do decaimento do poten-	
cial em função do tempo (Lowrie, 2007)	27
Princípio do Método Mise-à-la-masse. (A)Equipotenciais para o eletrodo num	
meio homogêneo (B)Equipotenciais para o eletrodo em contato com o corpo	
condutor (Kirsch, 2006) $\ldots$	29
Comparação do método mise-à-la-masse com um eletrodo de corrente em um	
meio homogêneo (Parasnis, 1967)	29
Mapa do componente Eletromagnético real da área de Vindfall 2(1)(Parasnis,	
1967)	32
Mapa do componente Eletromagnético imaginário da área de Vindfall 2(1)(Pa-	
rasnis, 1967)	33
Mapa de resistividade aparente da área de Vindfall $2(1)$ (Parasnis, 1967)	34
	Faixa de Variação de resistividade elétrica para algumas rochas, solos e minérios comuns (Lowrie, 2007)

2.4	Medidas de resistividade em poços de perfuração $2(1)$ (Parasnis, 1967) 3
2.5	Superfícies equipotenciais com o aterramento ocorrendo no poço 11 $2(1)$ (Pa-
	rasnis, 1967)
2.6	Curvatura dos poços na região de Vindfall $2(1)$ (Parasnis, 1967) 3
2.7	Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil 2860S (Aterra-
	mento no Poço 11) $2(1)$ (Parasnis, 1967)
2.8	Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil 2820S (Aterra-
	mento no Poço 11)2(1)(Parasnis, 1967) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 3$
2.9	Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil 2720S (Aterra-
	mento no Poço 11)2(1)(Parasnis, 1967) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 3$
2.10	Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil 2680S (Aterra-
	mento no Poço 11)2(1)(Parasnis, 1967) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 3$
2.11	Superfícies Equipotenciais com o aterramento ocorrendo no poço 33 $2(1)({\rm Pa-}$
	rasnis, 1967)
2.12	Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil $2820\mathrm{S}$ (Aterra-
	mento no Poço 33)2(1)(Parasnis, 1967) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 4$
2.13	Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil $2680\mathrm{S}$ (Aterra-
	mento no Poço 33)2(1)(Parasnis, 1967) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 4$
2.14	Equipotenciais no nível $+40m$ acima do nível do mar, para o aterramento no
	poço 11 $2(1)$ (Parasnis, 1967)
2.15	Equipotenciais no nível $+10m$ acima do nível do mar, para o aterramento no
	poço 11 $2(1)$ (Parasnis, 1967)
2.16	Fotografia do modelo tridimensional potencial mise-à-la-masse do depósito de
	chumbo, zinco e cobre de Vindfall $2(1)$ (Parasnis, 1967)
2.17	Geologia e localização dos poços na região de Gairloch 2(1) (Bowker, 1991) $\ . \ 4$
2.18	Seção dos resultados do Bloco 4 $2(1)$ (Bowker, 1991) 4
2.19	Seção dos resultados do levantamento de superfície do Bloco 4 $2(1)({\rm Bowker},$
	$1991) \dots \dots$
2.20	Comparação entre os perfis da seção vertical e da seção de superfície $2(1)$ (Bow-
	$\operatorname{ker}, 1991)  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $
2.21	Perfil através do poço 1 com o eletrodo de corrente fixado no poço $2(1)$ (Bow-
	ker, 1991)
2.22	Perfil através do poço 1 com o eletrodo de corrente fixado no Gossan $2(1)$ (Bow-
	$\ker, 1991) \dots \dots$
2.23	Modelo obtido com um levantamento de superfície e o eletrodo de corrente
	fixado no Gossan $2(1)$ (Bowker, 1991) $\ldots \ldots \ldots$

<ul> <li>no poço 1 2(1)(Bowker, 1991)</li></ul>
<ul> <li>2.25 Comparação entre o resultado teórico e a solução obtida pelo MODFLOW, sendo o resultado teoríco representado pela linha contínua e as medidas resultantes do MODFLOW respresentadas por círculos 2(1)(Osiensky, 1997)</li></ul>
<ul> <li>sendo o resultado teoríco representado pela linha contínua e as medidas resultantes do MODFLOW respresentadas por círculos 2(1)(Osiensky, 1997)</li></ul>
<ul> <li>tantes do MODFLOW respresentadas por círculos 2(1)(Osiensky, 1997)</li></ul>
<ul> <li>2.26 Distribuição da concentração de cinco plumas bidimensionais 2(1)(Osiensky, 1997)</li></ul>
<ul> <li>1997)</li></ul>
<ul> <li>2.27 Mapa de contorno simulado para campo potencial elétrico bidimensional do modelo ideal sem contaminação 2(1)(Osiensky, 1997)</li></ul>
modelo ideal sem contaminação 2(1)(Osiensky, 1997)52.28Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 2 2(1)(Osiensky, 1997)52.29Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 3 2(1)(Osiensky, 1997)52.30Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 4 2(1)(Osiensky, 1997)52.30Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 4 2(1)(Osiensky, 1997)5
<ul> <li>2.28 Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 2 2(1)(Osiensky, 1997)</li></ul>
1997)52.29Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 3 2(1)(Osiensky, 1997)52.30Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 4 2(1)(Osiensky, 1997)52.30Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 4 2(1)(Osiensky, 1997)5
<ul> <li>2.29 Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 3 2(1)(Osiensky, 1997).</li> <li>2.30 Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 4 2(1)(Osiensky, 1997).</li> <li>55 Structure</li> </ul>
1997)       5         2.30       Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 4 2(1)(Osiensky, 1997)       5         1997)       5
2.30 Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 4 2(1)(Osiensky,         1997)       5
1997)
2.31 Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 5 $2(1)(\mbox{Osiensky},$
1997)
2.32 Mapa de contorno simulado para campo potencial elétrico tridimensional do
modelo ideal sem contaminação $2(1)$ (Osiensky, 1997) 5
2.33Mapa de contorno em uma simulação 3D com a interferência de uma pluma
de contaminação 2(1) (Osiensky, 1997)
$2.34~{\rm Resposta}$ esperada para um levantamento mise-à-la-masse sem vazamento
2(1)(Wood e Palmer, 2000)
2.35Resposta esperada para um levantamento mise-à-la-masse com vazamento
2(1)(Wood e Palmer, 2000)
2.36 Resposta mise-à-la-masse na região C 1 $2(1)({\rm Wood}$ e Palmer, 2000) 66
2.37 Gradiente mise-à-la-masse na região C 1 $2(1)({\rm Wood}$ e Palmer, 2000) $\ .$ 6
2.38 Pseudo-seções de resistividade na região C1 2(1) (Wood e Palmer, 2000) $$ 6
2.39 Resposta mise-à-la-masse na região S1 2(1) (Wood e Palmer, 2000) 6
2.40 Pseudo-seções de resistividade na região S1 $2(1)$ (Wood e Palmer, 2000) 6
2.41 Resposta mise-à-la-masse na região C2 $2(1)$ (Wood e Palmer, 2000) 66
2.42 Pseudo-seções de resistividade na região C2 $2(1)$ (Wood e Palmer, 2000) 6
2.43 Resposta mise-à-la-masse na região S2 2(1)(Wood e Palmer, 2000) 6
2.44 Pseudo-seções de resistividade na região S2 $2(1)$ (Wood e Palmer, 2000) 6
2.45 Mapa de locação do poço de injeção e dos eletrodos para a análise do com-
portamento do traçador $2(1)$ (Nimmer e Osiensky, 2002)

2.46	Mapa de contorno das medidas de base do Potencial Elétrico ( $t_0 = 0$ ) 2(1)(Nim-	
	mer e Osiensky, 2002)	68
2.47	Mapa de contorno dos valores de $V_{rt_{0.83d}}$ 2(1) (Nimmer e Osiensky, 2002)	68
2.48	Mapa de contorno dos valores de $V_{rt_{3d}}$ 2(1) (Nimmer e Osiensky, 2002) $\ .$	69
2.49	Mapa de contorno dos valores de $V_{rt_{11d}}$ 2(1)(Nimmer e Osiensky, 2002)	69
2.50	Mapa de contorno dos valores de $V_{rt_{17d}}$ 2(1)(Nimmer e Osiensky, 2002)	70
2.51	Mapa de contorno dos valores de $V_{rt_{25d}}$ 2(1)(Nimmer e Osiensky, 2002)	70
2.52	Mapa de contorno dos valores de $V_{rt_{34d}}$ 2(1)(Nimmer e Osiensky, 2002)	70
2.53	Mapa da localização dos poços na região estudada $2(1)$ (Kumar, Krishna-	
	murthy, Ahmed, Jain e Dhar, 2003)	72
2.54	Padrão utilizado para as medidas utilizando o método mise-à-la-masse $2(1)({\rm Ku}-$	
	mar, Krishnamurthy, Ahmed, Jain e Dhar, 2003)	73
2.55	Litologia dos poços estudados 2(1) (Kumar, Krishnamurthy, Ahmed, Jain e	
	Dhar, 2003)	74
2.56	Mapa das equipotenciais do poço 219 $2(1)({\rm Kumar},{\rm Krishnamurthy},{\rm Ahmed},$	
	Jain e Dhar, 2003)	75
2.57	Mapa das equipotenciais do poço 252 $2(1)({\rm Kumar},{\rm Krishnamurthy},{\rm Ahmed},$	
	Jain e Dhar, 2003)	75
2.58	Mapa de contorno resultante do Potencial Espontâneo no poço 252 $2(1)({\rm Ku-}$	
	mar, Krishnamurthy, Ahmed, Jain e Dhar, 2003)	76
2.59	Mapa das equipotenciais do poço 256 2(1) (Kumar, Krishnamurthy, Ahmed,	
	Jain e Dhar, 2003)	76
2.60	Mapa das equipotenciais do poço 265 $2(1)$ (Kumar, Krishnamurthy, Ahmed,	
	Jain e Dhar, 2003)	77
2.61	Mapa das equipotenciais do poço 208 2(1)(Kumar, Krishnamurthy, Ahmed,	
	Jain e Dhar, 2003)	77
2.62	Mapa de contorno resultante do Potencial Espontâneo no poço 208 2(1)(Ku-	
	mar, Krishnamurthy, Ahmed, Jain e Dhar, 2003)	78
2.63	Mapa da localização onde foi realizado o experimento $2(1)$ (Pant, 2004)	80
2.64	Esquema dos perfis no poço DS-2 $2(1)$ (Pant, 2004)	81
2.65	Visão esquemática do experimento no poço DS-2 $2(1)$ (Pant, 2004)	82
2.66	Monitoramento das linhas de equipotencial no poço DS-2, para o eletrodo de	
	reterência N1 e o eletrodo de corrente remoto B' $2(1)$ (Pant, 2004)	84
2.67	Monitoramento das linhas de equipotencial no poço DS-2, para o eletrodo de	<u> </u>
	referência N2 e o eletrodo de corrente remoto B' $2(1)$ (Pant, 2004)	84

2.68	Relação entre o tempo percorrido e a distância atravessada pela linha equipo-	
	tencial no poço DS-2 para o eletrodo de referência N1 e o eletrodo de corrente	
	remoto B' $2(1)(Pant, 2004) \dots \dots$	85
2.69	Esquema dos perfis no poço CH-4 $2(1)$ (Pant, 2004)	86
2.70	Visão esquemática do experimento no poço CH-4 2(1)(Pant, 2004)	86
2.71	Monitoramento das linhas de equipotencial no poço CH-4, para os eletrodos	
	de referência N1, N2 e N3 $2(1)$ (Pant, 2004)	88
2.72	Relação entre o tempo percorrido e a distância atravessada pela linha equi-	
	potencial no poço CH-4 para os eletrodo de referência (a)N1, (b)N2 e (c)N3	
	2(1)(Pant, 2004)	89
2.73	Arranjo dos eletrodos para a pesquisa mise-à-la-masse na região geotermal de	
	Sumikawa, Japão 2(1) (Hatanaka, Aono, Mizunaga e Ushijima, 2005)	93
2.74	Distribuição de resistividade aparente do levantamento realizado em Sumi-	
	kawa, Japão 2(1) (Hatanaka, Aono, Mizunaga e Ushijima, 2005)	93
2.75	Distribuição de resistividade aparente residual do levantamento realizado em	
	Sumikawa, Japão 2(1) (Hatanaka, Aono, Mizunaga e Ushijima, 2005)	94
2.76	Distribuição de resistividade fatiada em relação à profundidade da inversão	
	3D 2(1)(Hatanaka, Aono, Mizunaga e Ushijima, 2005)	95
2.77	Região do aterro na cidade de Corigliano d'Otranto, com a posição do poço	
	P4 2(1) (De Carlo, Perri, Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani, 2013) $\ldots \ldots$	97
2.78	Localização das linhas onde foram realizadas as medidas na região de Corigli-	
	ano 2(1) (De Carlo, Perri, Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani, 2013)	98
2.79	Tomografia de resistividade elétrica ao longo da Linha 3 $2(1)({\rm De\ Carlo,\ Perri,\ }$	
	Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani, 2013)	99
2.80	Tomografia de resistividade elétrica ao longo da Linha 1 $2(1)({\rm De\ Carlo,\ Perri,\ }$	
	Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani, 2013)	99
2.81	Tomografia de resistividade elétrica ao longo da Linha 2. HDPE Level re-	
	presenta o nível do forro de polietileno $2(1)$ (De Carlo, Perri, Caputo, Deiana,	
	Vurro e Cassiani, 2013)	100
2.82	Mapa do mise-à-la-masse no aterro antigo 2(1)(De Carlo, Perri, Caputo, Dei-	
	ana, Vurro e Cassiani, 2013)	100
2.83	Seção do modelo 3D de referência do aterro de Corigliano d'Otranto 2(1)(De Cari	0,
	Perri, Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani, 2013)	101
2.84	Modelo 3D para o cenário onde o forro de polietileno está intacto $2(1)$ (De Carlo,	
	Perri, Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani, 2013)	101

2.85	Tomografia de resistividade elétrica simulada para o cenário considerando o	
	forro de polietileno intacto 2(1)(De Carlo, Perri, Caputo, Deiana, Vurro e	
	Cassiani, 2013)	102
2.86	Mapa simulado do mise-à-la-masse para o cenário considerando o forro de	
	polietileno intacto 2(1)(De Carlo, Perri, Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani,	
	2013)	102
2.87	Modelo 3D para o cenário onde o forro de polietileno está avariado 2(1)(De Carlo.	
	Perri, Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani, 2013)	103
2.88	Tomografia de resistividade elétrica simulada para o cenário considerando o	
	forro de polietileno avariado 2(1)(De Carlo, Perri, Caputo, Deiana, Vurro e	
	Cassiani, 2013)	103
2.89	Mapa simulado do mise-à-la-masse para o cenário considerando o forro de	
	polietileno avariado 2(1)(De Carlo, Perri, Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani,	
	2013)	104
2.90	Modelo 3D para o cenário onde o forro de polietileno está avariado e a não	
	existância de instalações para a drenagem do chorume 2(1)(De Carlo, Perri,	
	Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani, 2013)	104
2.91	Tomografia de resistividade elétrica simulada para o cenário considerando o	
	forro de polietileno avariado e a não existância de instalações para a drenagem	
	do chorume 2(1)(De Carlo, Perri, Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani, 2013)	104
2.92	Mapa simulado do mise-à-la-masse para o cenário considerando o forro de	
	polietileno avariado e a não existância de instalações para a drenagem do	
	chorume 2(1)(De Carlo, Perri, Caputo, Deiana, Vurro e Cassiani, 2013)	105
2.93	Esboco da caixa de areia com o recipiente de plástico utilizado para simular o	
	reservatório. (a) Geometria. (b) Visão superior. (c) Secão vertical cortando	
	os eletrodos A e B 2(1)(Ling, Revil, Qi, Abdulsamad, Shi, Nicaise e Pevras,	
	2019)	107
2.94	Mapas de contorno dos experimentos sintéticos para diferentes posicões do	
	vazamento 2(1)(Ling, Revil, Qi, Abdulsamad, Shi, Nicaise e Peyras, 2019).	108
2.95	Variação no Potencial elétrico medido no experimento para um único vaza-	
	mento 2(1)(Ling, Revil, Qi, Abdulsamad, Shi, Nicaise e Peyras, 2019)	109
2.96	Variação no Potencial elétrico medido no experimento para três e cinco furos	
	conectados 2(1)(Ling, Revil, Qi, Abdulsamad, Shi, Nicaise e Peyras, 2019) .	110
2.97	Distribuição da densidade de corrente para um vazamento pontual em dife-	
	rentes localizações 2(1)(Ling, Revil, Qi, Abdulsamad, Shi, Nicaise e Pevras.	
	2019)	111

2.98 Distribuição da densidade de corrente para três furos conectados em diferentes	
localizações $2(1)(\text{Ling, Revil, Qi, Abdulsamad, Shi, Nicaise e Peyras, 2019})$ .	112
2.99 Esboço dos testes de campo para detecção de vazamento 2(1)(Ling, Revil, Qi,	
Abdulsamad, Shi, Nicaise e Peyras, 2019)	113
2.100Perfis de resistividade elétrica para os testes de campo $2(1)$ (Ling, Revil, Qi,	
Abdulsamad, Shi, Nicaise e Peyras, 2019)	114
2.101 Variações na diferença de potencial elétrico medidas nos testes de campo	
$2(1)(Ling, Revil, Qi, Abdulsamad, Shi, Nicaise e Peyras, 2019) \dots \dots \dots$	114
2.102Distribuição da densidade de corrente para a detectação do vazamento nos	
testes de campo 2(1)(Ling, Revil, Qi, Abdulsamad, Shi, Nicaise e Peyras, 2019)	)115
2.103Fotos do campo de estudo 2(1)(Mary, Peruzzo, Boaga, Cenni, Schmutz, Wu,	
Hubbard e Cassiani, 2020) $\ldots$	116
2.104(a) Visão 3-D dos eletrodos de superfície(azul) e dos eletrodos em poços (preto)	
para a aquisição de eletrorresistividade; (b) Visão do topo dos eletrodos de su-	
perfície. Os pontos verdes mostram a posição das videiras $2(1)$ (Mary, Peruzzo,	
Boaga, Cenni, Schmutz, Wu, Hubbard e Cassiani, 2020)	117
2.105 Resultados da Tomografia de Resistividade Elétrica no temp o $T_0$ para a planta	
$A(a) \in B(b)$ 2(1)(Mary, Peruzzo, Boaga, Cenni, Schmutz, Wu, Hubbard e	
Cassiani, 2020) $\ldots$	118
2.106 Resultados da Tomografia de Resistividade Elétrica no temp o ${\cal T}_1$ para a planta	
B. (a) Resultados para os tempos $T_0, T_1, T_2, T_3, T_4 \in T_5$ . (b) Inversão de lapso	
do tempo para as razões $T_i$ e $T_0$ 2(1)(Mary, Peruzzo, Boaga, Cenni, Schmutz,	
Wu, Hubbard e Cassiani, 2020)	119
2.107Resultados do mise-à-la-masse para a Planta B. (a) eletrodo no caule no tempo	
$T_0$ . (b) eletrodo no caule no tempo $T_1$ . (c) eletrodo no solo no tempo $T_0$ . (a)	
eletrodo no solo no tempo $T_1$ . (e) Solução para um solo homogêne o $2(1)(Mary,$	
Peruzzo, Boaga, Cenni, Schmutz, Wu, Hubbard e Cassiani, 2020)	119
2.108Superfícies para a Planta B 2(1)(Mary, Peruzzo, Boaga, Cenni, Schmutz, Wu,	
Hubbard e Cassiani, 2020) $\ldots$	120
$2.109 \mathrm{Diagramas}$ da distribuição de eletror resistividade observadas na variação dos	
tempos para as plantas A(a) e B(b) 2(1) (Mary, Peruzzo, Boaga, Cenni, Sch-	
mutz, Wu, Hubbard e Cassiani, 2020)	120
2.110Variação no tempo da quantidade de água simulada em cinco profundidades	
$2(1)({\rm Mary}, {\rm Peruzzo}, {\rm Boaga}, {\rm Cenni}, {\rm Schmutz}, {\rm Wu}, {\rm Hubbard}$ e Cassiani, 2020)	121
2.111Gráfico da proporção dos temas estudados	122
2.112Tabela resumo dos artigos estudados	123

## Lista de Tabelas

2.1	Interseção entre os blocos de mineralização e os poços.	46
2.2	Dimensões de cada bloco condutor da região de Gairloch	48
2.3	Condições utilizadas nos modelos para gerar as plumas de contaminação hi-	
	potéticas	53
2.4	Monitoramento das equipotenciais ao longo do perfil 2, no poço DS-2 utili-	
	zando o eletrodo de referência N 1 $\ .$	83
2.5	Monitoramento das equipotenciais ao longo do perfil 2, no poço DS-2 utili-	
	zando o eletrodo de referência N2 $\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .$	83
2.6	Monitoramento das equipotenciais ao longo do perfil 1, no poço CH-4 utili-	
	zando o eletrodo de referência N 1 $\ .$	87
2.7	Monitoramento das equipotenciais ao longo do perfil 1, no poço CH-4 utili-	
	zando o eletrodo de referência N2 $\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .$	87
2.8	Monitoramento das equipotenciais ao longo do perfil 1, no poço CH-4 utili-	
	zando o eletrodo de referência N3 $\ .$	87

### Introdução

A revisão da literatura é um processo base para toda produção científica, uma vez que qualquer trabalho acadêmico, pesquisa, artigo ou publicação científicos iniciam-se a partir dela. Esta atividade contempla desde um simples levantamento bibliográfico até uma análise e uma síntese de todo material a disposição. O iniciante em uma nova área do conhecimento ou de interesse necessita desse primeiro passo. (Vosgerau e Romanowsk, 2014)

A quantidade de monografias, dissertações e teses defendidas anualmente no Brasil e no mundo exemplifica quão numerosos são os trabalhos acadêmicos produzidos. Acrescenta-se a estes, a publicação de periódicos e livros e a realização de diversos eventos científicos como congressos, simpósios, encontros etc. Toda esta produção científica encontra-se disponível para consulta e análise sempre que for proposto um outro conteúdo acadêmico, técnico, científico.

O emprego correto da revisão sistemática da literatura possibilita o conhecimento sobre determinado assunto, o mapeamento de conteúdos existentes, a descoberta e análise das abordagens metodológicas mais utilizadas. É possível, ainda rever, os procedimentos empregados, os resultados obtidos que podem ser replicados ou evitados. Além disso, pode-se apontar/ressaltar as lacunas de áreas que são primordiais a realização de novas pesquisas.

Na ciência Geofísica, a cuidadosa e criteriosa revisão da literatura é fundamental no desenvolvimento dos trabalhos e pesquisas. O crescimento perceptível da produção científica em Geofísica no Brasil permite uma variedade de material de pesquisa. Ainda assim, alguns temas na área são pouco investigados, estudados e utilizados. O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão sistemática da literatura sobre o Método Mise-à-la-masse, um dos Métodos Geofísicos Elétricos.

Os Métodos Geofísicos Elétricos utilizam o mapeamento das propriedades físicas elétricas das rochas, em particular a resistividade/condutividade, para estudar estruturas em subsuperfícies, principalmente em menores profundidades. Os três principais Métodos Elétricos são o 1 - Método da Eletrorresistividade (ER), o 2 - Método do Potencial Espontâneo (SP) e o 3 - Método de Polarização Induzida (IP). O primeiro mede as diferenças de potencial geradas a partir da introdução de correntes elétricas artificiais no subsolo, o que permite a definição de uma resistividade aparente para cada região. O segundo utiliza-se apenas das correntes naturais, sem a introdução de corrente artificiais, o que permite a localização de corpos com condutividades anômalas e o terceiro mede as diferenças de potencial oriundas da excitação devido a uma corrente externa.

O método mise-à-la-masse é um método elétrico que funciona como uma junção dos métodos da eletrorresistividade e do potencial espontâneo. É necessário o prévio conhecimento de um corpo condutor e o contato com o mesmo para a realização das medições – existência de um afloramento ou de uma perfuração. A preexistência de uma corrente natural, o assemelha com os levantamentos utilizando o método SP, porém um eletrodo de corrente é colocado em contato com este corpo, ocorrendo a introdução de uma corrente artificial como no método ER por meio de um arranjo de eletrodos especial. Essas peculiaridades do método permitem o mapeamento das linhas equipotenciais que refletirão a forma e posição do corpo condutor.

Inicialmente, o método mise-à-la-masse foi empregado na exploração mineral, porém o método é aplicado, atualmente, para delineação da pluma de contaminação em águas subterrâneas, para detecção de poluição originada de vazamentos na rede de esgoto e para a monitorização de traçadores em hidrogeologia, dentre outros. Devido a variedade de usos apresentados para este método e considerando que o mesmo ainda não é muito difundido, justifica-se esta revisão da literatura pertinente ao tema. Assim, o objetivo principal deste trabalho é realizar um levantamento da utilização do método no decorrer dos anos, para ser possível mapear a sua funcionalidade e as suas limitações.

Com o objetivo definido, foi-se realizado um levantamento de diversos artigos utilizando o Método Mise-à-la-masse, dentre os quais, onze foram escolhidos para serem discorridos nesse trabalho, com o intuito de analisar a aplicação em questão, bem como as informações interessantes que se pode tirar de cada uso do método estudado. Desta forma, espera-se deixar claro a aplicabilidade do Método Mise-à-la-masse, apontando as maiores áreas de interesse, ás areas onde ainda são necessários maiores estudos sobre a aplicabilidade do mesmo e o entendimento das maiores limitações do método de interesse.

## Capítulo 1

## Os Métodos Elétricos

A Geofísica é a ciência que busca estudar a subsuperfície medindo propriedades físicas da Terra. A propriedade física das rochas e dos minerais importante para a realização de uma investigação geoelétrica é a resistividade (ou sua inversa, a condutividade). Sua representação é feita pela letra  $\rho$  (rho) e a unidade no Sistema Internacional (SI) é  $\Omega.m$  (Ohm.m).

Existem diversos métodos para realizar um levantamento elétrico, o que permite uma ampla variedade de resultados, possíveis por meio da medida de diferenças de potencial e corrente elétrica. Essa quantidade de métodos e técnicas tem como base a imensa diversidade nos valores de resistividade elétrica dos materiais (Telford et al., 1990). Essa amplitude de valores pode ser observada na figura 1.1.

Os Métodos Elétricos utilizam de fontes naturais ou artificiais em seus levantamentos, sendo as fontes naturais os campos existentes dentro da Terra, enquanto em um levantamento com fonte artificial ocorre a introdução de correntes geradas artificialmente no subsolo. Neste capítulo, serão mostradas as fontes utilizadas, serão discutidos os métodos e as técnicas mais comumente utilizadas nessa área da Geofísica, incluindo o método objeto deste estudo: O Método Mise-à-la-masse.

### 1.1 Eletrorresistividade

Os princípios básicos do método da eletrorresistividade são a introdução, no subsolo, de correntes elétricas artificiais, e a leitura das diferenças de potencial geradas por estas correntes. A comparação entre as diferenças de potencial medidas e as diferenças de potencial esperadas para um solo homogêneo, permite a análise das inomogeneidades da subsuperfície.

A resistência elétrica de um material é definida como a capacidade que esse material possui de dificultar a passagem de corrente elétrica, e é medida em  $\Omega$  (ohm). A definição de resistividade elétrica é uma característica específica de cada material, levando em conside-



Figura 1.1: Faixa de Variação de resistividade elétrica para algumas rochas, solos e minérios comuns (Lowrie, 2007)

ração a relação com a área da seção transversal, a resistência elétrica e o comprimento do material. Esta propriedade é descrita pela Segunda Lei de Ohm representada na equação 1.1, onde  $\rho$  é a resistividade elétrica, medida em  $\Omega.m$ , R é a resistência elétrica, A corresponde a seção transversal e L é a medida do comprimento. Tanto a área da seção transversal, quanto o comprimento são medidos em m.

$$\rho = \frac{RA}{L} \tag{1.1}$$

Um fator importante a considerar é a forma como a corrente elétrica é conduzida no meio. Existem minerais que conduzem a eletricidade através da passagem de elétrons, que adquirem velocidade ao serem submetidos a um Campo Elétrico, o que chamamos de **condução eletrônica**. A grande maioria das rochas são formadas por materiais pouco condutores, desta forma, a corrente elétrica é conduzida, principalmente, atráves dos íons que estão dissolvidos na água de formação no interior dos poros, no processo que chamamos de **condução eletrolítica**. Esses íons comportam-se como elétrons ao serem submetidos a um Campo Elétrico. Como a condução eletrolítica é muito mais comum, a porosidade é um fator importante no estudo da resistividade das rochas. A fórmula empírica proposta por Archie está descrita a seguir

$$\rho = \frac{a\rho_w}{\theta^b S^c} \tag{1.2}$$

De acordo com a Primeira Lei de Ohm, tem-se a relação  $\Delta V = RI$ , onde  $\Delta V$  corrensponde a diferença de potencial gerada através da passagem de uma corrente elétrica I. Podemos deduzir da equação 1.1 que  $R = \frac{\rho L}{A}$ , comparando-se essa dedução com a Primeira Lei de Ohm, tem-se que  $\frac{\Delta V}{I} = \frac{\rho L}{A}$ . Organizando essa relação chega-se a equação

$$\frac{\Delta V}{L} = \frac{\rho I}{A} \tag{1.3}$$

Considerando o comportamento de um único eletrodo de corrente em um meio homogêneo, que introduz uma corrente I na subsuperfície, conforme a figura 1.2, observa-se que as linhas de fluxo de corrente fluem de forma radial, o que leva a formação de superfícies equipotenciais na forma de cascas de semi-esferas, uma vez que o fluxo de corrente é normal as superfícies equipotenciais. Considerando, ainda, que as superficíes equipotenciais estão a uma distância r do eletrodo e a área da superfície equipotencial equivale a área superficial da casa de meia esfera de raio r, o valor de A vale  $2\pi r^2$ . Considerando estas informações, e analisando a equação 1.3, tem-se a equação que segue:

$$\frac{\Delta V}{r} = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \tag{1.4}$$

Integrando ambos os lados da igualdade da equação 1.4 em relação a r, e considerando que a constante de integração é zero, pois a diferença de potencial tende a zero, quando o raio tende ao infinito, tem-se que

$$V_r = \frac{\rho I}{2\pi r} \tag{1.5}$$

Analisando, agora, um arranjo padrão com quatro eletrodos, sendo dois eletrodos de corrente e dois para a medição da diferença de potencial, conforme a figura 1.3, onde A e B são eletrodos de corrente e C e D são eletrodos de potencial, temos que o potencial no eletrodo C será a soma das contribuições da fonte e do sumidouro, de forma que  $V_C = V_A + V_B$ , onde  $V_A = \frac{\rho I}{2\pi r_{AC}}$  e  $V_B = \frac{\rho I}{2\pi r_{CB}}$ . Desta forma, tem-se que o potencial em C vale:

$$V_C = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{CB}} \right) \tag{1.6}$$

De forma análoga,

$$V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AD}} - \frac{1}{r_{DB}} \right) \tag{1.7}$$



Figura 1.2: Linhas de Campo Elétrico e Superfícies equipotenciais a partir de um único eletrodo em um semi-espaço homogêneo. Adaptada de (Lowrie, 2007)

Para medir a diferença de potencial entre os eletrodos C e D, considera-se as equações 1.6 e 1.7, de forma que:

$$\Delta V = V_C - V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{CB}} \right) - \left( \frac{1}{r_{AD}} - \frac{1}{r_{DB}} \right) \right]$$
(1.8)  

$$A = \frac{1}{C_{H}} + \frac{1}{C_{H}} + \frac{1}{C_{H}} + \frac{1}{C_{B}} + \frac{1}{C_{H}} + \frac{1}{C_{$$

Figura 1.3: Configuração com quatro eletrodos (Lowrie, 2007)

Como em situações reais, o cálculo da resistividade é afetado pela complexidade das diversas litologias e estruturas geológicas, uma vez que se trata de subsuperfícies não homogêneas, e essa complexidade não é levada em consideração ao realizar os cálculos apresentados, os valores encontrados são chamados de **resistividade aparente**,  $\rho_a$ . Essa resistividade aparente descreve a forma e as propriedades elétricas das anomalias do subsolo comparandoas com um meio homogêneo. Considerando a equação 1.8, tem-se que o valor da resistividade aparente é dado por:

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I\left[\left(\frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{CB}}\right) - \left(\frac{1}{r_{AD}} - \frac{1}{r_{DB}}\right)\right]} \tag{1.9}$$

Na equação 1.9, a parte da equação que depende unicamente da distribuição dos eletrodos é denominada **fator geométrico**. Chamando o fator geométrico de K, tem-se que

$$K^{-1} = \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{CB}} \right) - \left( \frac{1}{r_{AD}} - \frac{1}{r_{DB}} \right) \right]$$
(1.10)

#### 1.1.1 Arranjos

Conforme demonstrado, anteriormente, é extremamente importante o conhecimento do posicionamento dos eletrodos para o cálculo da resistividade aparente. Uma vez que o fator geométrico, K, é parte integrante da equação 1.9. Existem diversas configurações de eletrodos possíveis, e o conhecimento da geologia e alvos de investigação vão definir qual o melhor arranjo que deverá ser empregado. Os quatro arranjos mais conhecidos são: Wenner, Schlumberger, Polo-dipolo e Dipolo-dipolo. A disposição dos eletrodos de corrente A e B e dos eletrodos de potencial C e D, em todas as quatro configurações, podem ser observadas na figura 1.4.



Arranjo Schulumberger

Arranjo polo-dipolo

Figura 1.4: Posicionamento dos eletrodos nos quatro arranjos. Adaptada de (Sato, 2002)

#### Arranjo Wenner

O arranjo Wenner é a configuração mais simples, sendo caracterizada pelo espaçamento igual entre os eletrodos, uma vez que os quatro eletrodos são mantidos sob um mesmo espaçamento a entre eles. Assim, sempre que for necessário alterar o espaçamento entre os eletrodos, será essencial garantir que o espaçamento entre eles continuem iguais. Desta forma, tem-se que:

$$r_{AC} = a \, ; \, r_{AD} = 2a$$

$$r_{CB} = 2a \ ; \ r_{DB} = a$$

Substituindo as medidas anteriores na equação 1.10, tem-se o fator geométrico

$$K^{-1} = \frac{1}{2\pi a}$$

Com a equação do fator geométrico definida, podemos calcular a resistividade aparente em um arranjo Wenner, substituindo o valor do fator geométrico na equação 1.9. Assim, o valor da resistividade aparente no arranjo em questão vale

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

#### Arranjo Schlumberger

Conforme a figura 1.4, é possível observar que este arranjo apresenta os eletrodos de potencial em um espaçamento b, menor que o espaçamento entre os eletrodos de corrente, que vale 2a. Nesta configuração temos as seguintes medidas das distâncias entre os eletrodos:

$$r_{AC} = a - \frac{b}{2}; r_{AD} = a + \frac{b}{2}$$
  
 $r_{CB} = a + \frac{b}{2}; r_{DB} = a - \frac{b}{2}$ 

Calculando o fator geométrico e substituindo na equação 1.9, chega-se na equação

$$\rho_a = \frac{\Delta V \pi}{I} \left( \frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right)$$

É valido pontuar que para valores muitos altos de 2a, talvez seja necessário aumentar o valor de *b*, para que seja possível medir a diferença de potencial (Sato, 2002).

#### Arranjo Polo-Dipolo

Este arranjo, também conhecido como meio-schlumbeger, é o que mais se aproxima do método mise-à-la-masse, uma vez que nesse arranjo, o eletrodo de corrente B é locado no infinito, não tendo nenhuma contribuição para as medidas de potencial. Logo, tem-se apenas um eletrodo de corrente localizado a uma distância proporcional a distância que os eletrodos de potencial tem entre si, conforme a figura 1.4 (Sato, 2002). Conforme, essas orientações, chega-se nas medidas:

$$r_{AC} = na; r_{AD} = a(n+1)$$

Essas medidas levam a resistividade aparente calculada por:

$$\rho_a = \frac{\Delta V 2\pi}{I} an(n+1)$$

#### Arranjo Dipolo-Dipolo

No Arranjo Dipolo-Dipolo, os eletrodos de corrente estão em um certa distância entre si para formarem um dipolo, com os eletrodos de potenciais também seguindo a mesma regra e a mesma distância *a* entre si, são formados um dipolo de corrente e um dipolo de potencial. A distância entre ambos os dipolos deve ser um múltiplo da distância entre os eletrodos de cada dipolo, conforme pode ser observado na figura 1.4 (Sato, 2002). As medidas necessárias para o cálculo da resistividade aparente ficam

$$r_{AC} = a(n+1); r_{AD} = a(n+2)$$
  
 $r_{CB} = an; r_{DB} = a(n+1)$ 

Substituindo estas medidas na equação 1.9, chega-se à fórmula:

$$\rho_a = \frac{\Delta V \pi}{I} an(n+1)(n+2)$$

#### 1.1.2 Técnicas

Enquanto tem-se incontáveis possibilidades de arranjos para os levantamento geoelétricos, existem duas técnicas que podem ser empregadas. Se o objetivo é analisar as variações de resistividades em relação a profundidade, deve-se utilizar a Sondagem Elétrica Vertical. Porém se o desejado é a variação de resistividade em função da extensão lateral do meio desejado, a técnica mais indicada é o Caminhamento Elétrico.

#### Sondagem Elétrica Vertical

A Sondagem Elétrica Vertical (SEV) é empregada quando se busca as variações de resistividades das interfaces horizontais, ou seja, a variação da resistividade em função da profundidade. Desta forma, o arranjo escolhido deve ser mantido com o seu ponto central fixo, e a medida que a distância entre os eletrodos for aumentando, conseguem-se medidas da resistividade de camadas cada vez mais profundas do subsolo. A distância entre os eletrodos aumenta a profundidade de alcance do fluxo de corrente elétrica.

Esta técnica é bastante útil para indicar as espessuras das camadas do subsolo definindo os seus limites, além do número de camadas até o embasamento, se possível realizar o levantamento até a profundidade do mesmo, e calcular a resistividade de cada camada. Analisando a figura 1.5, é possível verificar que o aumento do espaçamento entre os eletrodos, utilizando o arranjo Schlumberger e mantendo o ponto central fixo, leva a medição de regiões cada vez mais profundas. Com os eletrodos mais próximos, a medida da resistividade aparente tende ao valor da primeira camada, enquanto que ao aumentar a distância entre os eletrodos, a resistividade aparente calculada aproxima-se do valor da camada mais profunda.



Figura 1.5: Medidas de resistividade aparente com o aumento da distância entre os eletrodos, o que leva a um aumento na profundidade de penetração da corrente elétrica (Kirsch, 2006)

Para realizar a interpretação de uma sondagem elétrica vertical é preciso analisar as curvas resultantes do levantamneto, conforme a variação da profundidade e da resistividade. A figura 1.6 mostra a variação da resistividade aparente em função do aumento do distanciamento entre os eletrodos, para o caso de três camadas horizontais. Os gráficos mostram as variações possíveis e o quanto seriam problemáticos para a interpretação, os casos onde a camada intermédiária também possui um valor de resistividade intermediário com relação as outras camadas, pois ficaria quase impossível identificá-la na curva. Esta situação só fica cada vez mais complexa com o aumento no número de camadas da região.

#### Caminhamento Elétrico

No Caminhamento Elétrico, o distanciamento entre os eletrodos são mantidos constantes, e todo o arranjo é movido lateralmente durante o levantamento, de forma a realizar medidas das variações laterais em uma profundidade fixada, conforme a figura 1.7 . Esta técnica acaba sendo bastante empregada na exploração mineral, uma vez que é excelente para localizar corpos anômalos que apresentem resistividade distinta do meio que ele se encontra. Além



Figura 1.6: Variação da resistividade aparente sobre 3 camadas horizontais (Kearey, Hill e Brooks, 2009)

deste emprego, o Caminhamento Elétrico é utilizado, também, para localização de diques, falhas e outras variações verticais.



Figura 1.7: Técnica do Caminhamento Elétrico utilizando um arranjo Dipolo-Dipolo (Braga, 2016)

### 1.2 Potencial Espontâneo

O Método do Potencial Espontâneo (SP), diferente do método da eletrorresistividade, não utiliza a introdução de correntes geradas artificialmente, sendo um método baseado nas fontes naturais de corrente elétrica. O procedimento básico é a medição da diferença de potencial entres dois eletrodos, localizados em superfície, no meio natural, sem a exposição de um campo elétrico artificial.

O potencial espontâneo é causado por atividade eletroquímica ou mecânica (Gallas, 2005). Este potencial espontâneo pode ser causado pelo fluxo natural de fluidos, calor ou

íons no subsolo, o que torna este método de excelente uso para questões ambientais, onde a localização das fontes e a delineação destes fluxos naturais são o objetivo do levantamento. O potencial natural é oriundo de reações eletroquímicas entre um corpo mineral condutor e a rocha encaixante.

Na prospecção mineral, utilizando o método do Potencial Espontâneo, foi observado que existem duas reações eletroquímicas ocorrendo na interface corpo/rocha encaixante, uma acima do nível do lençol freático, e outra abaixo. Conforme a figura 1.8, é possível observar que acima do corpo, as substâncias dissolvidas nesta região sofrem redução, recebendo elétrons, enquanto na parte inferior, estas substâncias sofrem oxidação perdendo elétrons. Desta forma, o corpo mineral acaba por se comportar como uma ligação elétrica entre estas regiões, gerando um fluxo de corrente elétrica. As anomalias de SP observadas são negativas, haja vista, o topo do corpo mineral estar agindo como um terminal negativo de um circuito elétrico.



Figura 1.8: O mecanismo das anomalias de potencial espontâneo (Kearey, Hill e Brooks, 2009)

Com relação às questões ambientais, de engenharia e hidrogeologia, o fênomeno do potencial espontâneo é explicado de acordo com dois outros conceitos. São eles: o potencial de difusão e o potencial de fluxo. O potencial de difusão surge a partir dos íons presentes nos poros do substrato. Isto ocorre porque os íons em movimento, formam duas regiões com sinais opostos, gerando, assim, uma diferença de potencial.

O potencial de fluxo é gerado através do movimento dos fluidos presentes nos poros e descontinuidades das rochas. Considerando-se a porosidade da rocha como uma rede de capilares, a passagem do eletrólito por essa rede gera uma diferença de potencial entre os lados da mesma, uma vez que os ânions são absorvidos pelas paredes destes capilares e atraem os cátions que percorrem livremente esta rede através do fluxo do fluido. Desta forma, surge uma dupla camada elétrica que, por sua vez, gera uma diferença de potencial.

### 1.3 Polarização Induzida

O Método da Polarização Induzida (IP) é baseado no princípio que, ao utilizar-se um arranjo padrão de 4 eletrodos em um levantamento de corrente contínua, ao desligar esta corrente de forma abrupta, o potencial não cai a zero instantaneamente. Primeiro, observa-se um grande decaimento, e após este decréscimo, o potencial decai em função do tempo até chegar ao zero. Esse fenômeno pode ser melhor observado através da figura 1.9, onde é possível observar a queda do potencial após o desligamento da corrente. Após a corrente ser religada, também ocorre um aumento abrupto do potencial e, logo após, um crescimento progressivo até chegar em um valor estável. Este ciclo continua enquanto a corrente for desligada e ligada continuamente, caracterizando o solo como um capacitor, pois o solo acaba armazenando carga elétrica e se tornando eletricamente polarizado.



Figura 1.9: (a)Ilustração do decaimento do potencial. (b) Efeito do decaimento do potencial em função do tempo (Lowrie, 2007)

O decaimento e o crescimento do potencial ocorre devido a polarização induzida, que é o resultado de dois processos: a polarização de membrana e a polarização de eletrodo.

A polarização de membrana ocorre com a corrente elétrica sendo gerada através do fluxo de eletrólitos nos fluídos, que são excitados pelo Campo Elétrico artificial aplicado. Com esta excitação, os íons positivos possuem uma facilidade em navegar pelos poros, enquanto que os íons negativos se aglomeram, formando assim uma polarização. Quando esta corrente externa é retirada, os íons retornam gradativamente às suas posições iniciais.

A polarização de eletrodo é caracterizada pela presença de minerais condutivos, como os metais. Com a aplicação de uma corrente externa nesta situação, os grãos de material condutivo se polarizam com cargas positivas e negativas em lados opostos. Os íons da solução presente nos poros são, então, atraídos para esses grãos, causando um aumento de carga. Quando a voltagem externa é retirada, os íons, lentamente, se dispersam, o que leva a um decaimento gradual da voltagem.

### 1.4 O Método Mise-à-la-masse

Pode-se traduzir o termo frânces mise-à-la-masse como "excitação de massa", o que remonta a teoria fundamental do método mise-à-la-masse, que busca o mapeamento do resultado de uma excitação de cargas em um corpo condutivo. O método apareceu por volta de 1960, e tem, historicamente, sido utilizado na exploração mineral e em investigações de água subterrânea, inicialmente em países da antiga União Soviética, na Europa central e oriental e na China (Reynolds, 2011).

O método mise-à-la-masse ou de excitação de massa é um método que utiliza do arranjo polo-dipolo para a situação onde um corpo condutivo está acessível, seja por afloramento ou perfuração. Na configuração deste método, um eletrodo de corrente é colocado em contato com a zona condutiva, enquanto o outro eletrodo de corrente é locado a uma distância grande o suficiente para ser desprezado. Desta forma, utilizando da técnica do caminhamento elétrico, os eletrodos de potencial mapearão as superfícies equipotenciais, que darão informações quanto a extensão, mergulho, direção e continuidade do corpo condutivo. O mapeamento das superfícies equipotenciais em todas as direções é possível porque o segundo eletrodo de corrente está localizado no infinito, não apresentando interferência na região.

Outra possibilidade de arranjo é a demonstrada na figura 1.10, onde tem-se um eletrodo de corrente em contato com o corpo condutivo e um eletrodo de potencial realizando as medidas do campo potencial resultante da corrente elétrica injetada pelo eletrodo em contato com o corpo. No arranjo demonstrado na figura 1.10, os demais eletrodos são locados em um ponto teoricamente ao infinito.

O contato do eletrodo de corrente com o corpo aflorado permite que esse método forneça muito mais informações do que a utilização da técnica do caminhamento elétrico em superfície, uma vez que as linhas de equipotenciais são concêntricas em volta do condutor em um meio homogêneo. Porém, é necessário já ter um prévio conhecimento sobre o objeto alvo do levantamento, como, por exemplo, a localização de um possível ponto de contato para locação do eletrodo e a ciência da natureza condutiva do corpo.

A figura 1.11 mostra o princípio básico do método mise-à-la-masse, pois é possível observar que um eletrodo de corrente gera superfícies equipotenciais na forma de uma semiesfera, o que pode ser facilmente calculado, porém ao colocar-se um eletrodo de corrente em



Figura 1.10: Princípio do Método Mise-à-la-masse. (A)Equipotenciais para o eletrodo num meio homogêneo (B)Equipotenciais para o eletrodo em contato com o corpo condutor (Kirsch, 2006)

contato com um corpo condutivo, mantendo o mesmo arranjo, as linhas de equipotenciais darão, agora, informações sobre o corpo como forma, mergulho, etc. Essa delineação do corpo condutivo, também pode ser observada na figura 1.10.



Figura 1.11: Comparação do método mise-à-la-masse com um eletrodo de corrente em um meio homogêneo (Parasnis, 1967)

O método mise-à-la-masse é mais comumente empregado na exploração mineral, porém vem ganhando espaço entre outras áreas, já sendo, também, utilizado para delineação da pluma de contaminação em águas subterrâneas, para detecção de poluição originada de vazamentos na rede de esgoto e para a monitorização de traçadores em hidrogeologia, dentre outros.

## Capítulo 2

### Estudos de Casos na Literatura

A revisão sistemática da literatura de determinado assunto é fundamental para o mapeamento de conteúdos já abordados. A observação dos resultados obtidos valida a aplicação do método e indica a possibilidade de replicá-lo ou evitá-lo.

Neste capítulo, serão apresentados diversos estudos que empregaram o método miseà-la-masse. A partir dos artigos serão avaliadas as metodologias abordadas, as aplicações do método e os resultados obtidos. Os artigos escolhidos foram organizados em ordem cronológica, possibilitando uma análise da evolução do uso do método no decorrer dos anos.

Após o levantamento bibliográfico realizado, observou-se a proporção da quantidade total de artigos encontrados da seguinte forma: cerca de 43 % artigos referentes à utilização do método na exploração mineral, quanto as aplicações em água subterrânea e questões ambientais, a porcentagem foi por volta de 40 %, já os restantes 17 % foram referentes aos demais casos, como aplicações na engenharia ou artigos referentes apenas as condições especiais do uso do método, no geral.

### 2.1 Utilização do Método Mise-à-la-masse em um depósito de chumbo, zinco e cobre

Em Parasnis (1967), foi realizado um levantamento, utilizando o método mise-à-la-masse, na região central da Suécia, em um depósito de chumbo, zinco e cobre. Nesse levantamento, os potenciais elétricos foram medidos em superfície, bem como em mais de 25 poços de sondagem, com aterramentos em três diferentes regiões do depósito de minério. Além dessas medidas, outras foram realizadas em dois poços de sondagem distantes da região deste depósito de minério.

Devido a irregularidade na geometria do depósito de minério, foi complicado realizar uma correlação entre os poços, de forma que, o método mise-à-la-masse foi fundamental por mostrar informações como o mergulho do corpo de minério, tornando possível estabelecer uma conexação entre as diferentes larguras encontradas nos poços, e, assim, auferir informações quanto a forma do corpo de minério.

O objeto de estudo destas investigações está localizado numa área chamada Vindfall, situada a 8 km do sudeste da cidade de Sandviken na Suécia. A ocorrência de minérios nessa região foi descoberta em 1959, quando um geológo descobriu seixos de chumbo e zinco nos detritos glaciais da região. As pesquisas que se sucederam descobriram duas linhas paralelas de seixos de minérios, uma com 900 m de comprimento e outra com cerca de 2500 m de comprimento, com uma distância de aproximadamente 500 m entre elas.

O primeiro passo para o estudo da área de Vindfall foi realizar um levantamento eletromagnético para reconhecimento da região. As figuras 2.1 e 2.2 mostram, respectivamente, o mapa do componente eletrmoagnético real e o mapa do componente eletromagnético imaginário da região estudada.



Figura 2.1: Mapa do componente Eletromagnético real da área de Vindfall (Parasnis, 1967)

Em ambos os mapas, é possível visualizar o final da linha de seixos mais ao oeste e a terça parte final da linha mais oriental, sendo que os seixos de minérios estão sendo representados por triângulos.

A análise da figura 2.1 mostra que as anomalias do componente real apresenta uma variação menor que  $\pm 1\%$ , uma vez que o mapa apenas apresenta linhas de contorno zero. Por sua vez, a figura 2.2, que representa o componente imaginário, apresenta anomalias mais fortes, pois além de apresentar os contornos zero (linhas tracejadas), também apresenta os



Figura 2.2: Mapa do componente Eletromagnético imaginário da área de Vindfall (Parasnis, 1967)

contronos  $\pm 2\%$  (linhas contínuas). Contudo, em nenhum dos mapas é possível verificar um padrão regular de anomalias eletromagnéticas.

Inspeções mais detalhadas levaram a crer que a falta de anomalias eletromagnéticas significativas foi devida a condutividade do material acima do embasamento, e da sua pequena variação de condutividade. Desta forma, essa camada é tratada como uma fina camada condutiva e o levantamento eletromagnético acaba levando em consideração informações oriundas, principalmente, do embasamento. Neste caso, medidas eletromagnéticas não serão de grande utilidade para o estudo da região de interesse.

Após os resultados do levantamento eletromagnético, foram realizadas medidas de resistividade. O mapa representado na figura 2.3 mostra as medidas de resistividade aparente da região de Vindfall.

Diferente dos mapas de anomalias eletromagnéticas, os valores de resistividade aparente mostraram um padrão que levaram a uma interpretação de um strike no sentido NNE-SSO.

Como a camada de sobrecarga, acima do embasamento desta região, é de uma pequena espessura, este levantamento mapeou estruturas presentes no embasamento da área. Sendo, assim possível, devido a longa distância entre os eletrodos de corrente na geometria da aquisição, com a finalidade de serem mapeadas regiões mais profundas.

A análise do mapa da figura 2.3 permite verificar uma faixa de variação dos valores de resistividade aparente entre  $2 - 5 k\Omega .m$ , sendo possível observar valores mais baixos de resistividade,  $0.5 k\Omega .m$ , numa área onde passa um cabo telefônico enterrado envolto em cobre.



Figura 2.3: Mapa de resistividade aparente da área de Vindfall (Parasnis, 1967)

O mapa de resistividade da região foi útil ao fornecer informações estruturais sobre a região, porém não apropriado para identificar áreas onde a locação de poços seriam interessantes para o estudo do corpo de minério. Desta forma, os primeiros poços foram alocados na linha de seixos já conhecidas, sendo possível ver no mapa a localização dos poços numerados de 1 a 12, onde desses apenas os poços de nº 7 ao nº 12 apresentaram ricas mineralizações de chumbo e zinco. As perfurações continuaram na direção norte desta linha de seixos, ao ponto que o corpo de minério mãe foi localizado a altura dos poços de nº 27 e nº 37, poços esses que apresentaram minérios de diversas qualidades e extensões. Contudo, mesmo com a qrande quantidade de poços perfurados, foi extremamente complicado estabelecer uma correlação geológica entre as rochas e espessuras encontradas nos diferentes poços, bem como apontar uma direção do mergulho, o que tornou evidente a irregularidade da geometria da mineralização da região.

A figura 2.4 mostra alguns exemplos de resultados obtidos em diferentes poços, evidenciando a larga diferença entre as medidas de resistividade aparente apresentada entre os poços. Devido a esta dificuldade encontrada para estabelecer uma continuidade geológica da região, estudos utilizando o método mise-à-la-masse foram cruciais para explicar a geometria da mineralização local e guiar futuros poços exploratórios.

A técnica utilizada para as medidas utilizando o método mise-à-la-masse foi simples, aterrando um eletrodo de corrente em contato com um minério condutivo encontrado em determinado poço, ao tempo em que o outro eletrodo de corrente foi posicionado a uma



Figura 2.4: Medidas de resistividade em poços de perfuração (Parasnis, 1967)

distância de 2 km do local da medição. As medições foram então realizadas sucessivamente, alternando com períodos de novas perfurações exploratórias do depósito. Medidas de potencial foram realizadas na superfície, em três áreas de extensão  $800 m \ge 400 m$  utilizando um grid de 20 m, bem como em 25 poços.
### Eletrodo de corrente no Poço 11

A figura 2.5 representa as superfícies equipotenciais observadas na superfície quando um dos eletrodos de corrente foi locado dentro do poço 11, a uma profundidade de 49 m. Essa figura também apresenta os poços que estão localizados na região próxima ao poço central. O mapa em questão apresenta as larguras dos corpos de minérios projetadas verticalmente em subsuperfíce, por ser considerada a projeção mais satisfatória para os dados analisados. Para a plotagem da extensão dos corpos de minérios somente foram utilizadas as seções com valores maiores que 0.5% de chumbo (Pb) e 0.1% de cobre (Cu).



Figura 2.5: Superfícies equipotenciais com o aterramento ocorrendo no poço 11 (Parasnis, 1967)

A observação das superfícies equipotenciais respresentadas na figura 2.5 mostra que elas não são círculos centrados no epicentro do eletrodo de corrente, como esperado em um meio homogêneo, mas sim apresentam uma forma mais elíptica. O eixo principal desta elipse indica que a direção do mergulho é aproximadamente N  $25-30^{\circ}$  L. Outra evidente observação é o fato das equipotenciais não sofrerem distorções relevantes das áreas adjacentes. Porém, é notório que existe um espaçamento maior entre as superfícies equipotenciais mais ao sul do corpo de minério central do que ao norte, onde as superfícies apresentam um menor espaçamento. Isso leva a crer na existência de algum outro material condutor mais ao sul do epicentro do levantamento, mesmo que não exista nenhum poço de perfuração que tenha registrado uma informação que comprove esta teoria levantada.

A próxima análise a ser realizada é do potencial nos poços. Para tanto é necessário primeiro considerar que a inclinação da grande maioria dos poços torna-se menos íngreme com a profundidade, conforme demonstrado na figura 2.6, que simboliza os poços através de



um corte perpendicular ao respectivo plano vertical que representa cada poço.

Figura 2.6: Curvatura dos poços na região de Vindfall (Parasnis, 1967)

Um perfil traçado através do perfil 2860S apresenta as suas superfícies equipotenciais, representadas num plano vertical, baseado em medidas dos poços 8, 34, 50 e na superfície, como mostradas na figura 2.7. Como o centro das equipotenciais está localizado a uma distância aproximada de 14.5 m de profundidade no poço 8, é possível concluir que nesta posição está o valor máximo do potencial observado, o que leva a crer que o minério presente no poço 8 está em contato direto com o minério no poço 11, onde está situado o eletrodo de corrente energizado.

De forma análoga ao observado na figura 2.7, tem-se o perfil 2820S, representado pela figura 2.8, porém este último esta localizado mais ao norte do eletrodo de corrente no poço 11. A profundidade do centro das equipotenciais nesse perfil está em uma profundidade entre 40 m e 80 m no poço 7, confirmando que o minério localizado nesta profundidade do poço 7 está em contato com o corpo de minério do poço 11 e, por consequência, com o minério do poço 8.

Concluindo esta análise, tem-se a figura 2.9, que mostra outro perfil onde o minério central também faz contato direto com o corpo de minério dos poços 7, 8 e 11. O centro deste perfil 2720S está localizado a uma profundidade de 25 m, e como o centro dos perfis



Figura 2.7: Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil 2860S (Aterramento no Poço 11) (Parasnis, 1967)



Figura 2.8: Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil 2820S (Aterramento no Poço 11)(Parasnis, 1967)

2820S e 2860S estavam localizados a profundidades de 35 m e 45 m respectivamente, isto demonstra que a superfície do corpo de minério está inclinando suavemente para a direção sul.

A figura 2.10 é um exemplo de seção que mostra superfícies equipotenciais representando



Figura 2.9: Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil 2720S (Aterramento no Poço 11)(Parasnis, 1967)

um minério que não está diretamente em contato com o minério conectado ao eletrodo de corrente carregado do poço 11, uma vez que as suas equipotenciais não estão centradas no minério do poço 33.



Figura 2.10: Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil 2680S (Aterramento no Poço 11)(Parasnis, 1967)

#### Eletrodo de corrente no Poço 33

Conforme informado anteriormente, existe um corpo de minério presente no poço 33 diferente do estudado no poço 11. Desta forma, uma análise, análoga a que foi realizada com o eletrodo de corrente em contato com o minério no poço 11, foi realizada com o eletrodo de corrente aterrado no poço 33 com um profundidade de 89 m no poço, o equivalente a uma profundidade vertical de 65 m da superfície.

As superfícies equipotenciais resultantes foram, então, representadas na figura 2.11. As equipotenciais para os valores de 0, 500, 1000 e  $1500 \, mV$  apresentam formato quase elíptico, com seu eixo principal formando um strike na direção NNE-SSO. Contudo, as equipotenciais mais centrais apresentam um formato mais quadrado, o que leva a acreditar na possibilidade da existência de algum outro corpo condutivo na vizinhança. Por sorte, a perfuração do poço 37 encontrou outro corpo de minério que pode resolver esta questão, pois não existe evidências da possibilidade do corpo de minério do poço 11 afetar o encontrado no poço 33.



Figura 2.11: Superfícies Equipotenciais com o aterramento ocorrendo no poço 33 (Parasnis, 1967)

Considerando o perfil 2820S, a figura 2.12 apresenta equipotenciais que não se centram ao redor do minério do poço 7, como ocorreu na figura 2.8, demonstrando, mais uma vez, que não ocorre ligação entre os minérios dos poços 11 e 33. Contudo, na figura 2.13 o centro das equipotenciais está localizado exatamente no minério localziado no poço 33, ao contrário do representado na figura 2.10.



Figura 2.12: Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil 2820S (Aterramento no Poço 33)(Parasnis, 1967)



Figura 2.13: Superfícies Equipotenciais na seção vertical através do perfil 2680S (Aterramento no Poço 33)(Parasnis, 1967)

### Curvas equipotenciais em diferentes níveis

A superfície da área de Vindfall é razoalvemente plana, com uma altura média de 70 m acima do nível do mar. O eletrodo de corrente locado no poço 11, que gerou as equipotenciais apresentadas na figura 2.5, está a uma altura de +30 m acima do nível do mar. Foram construídas equipotenciais para os níveis +40 m e +10 m acima do nível do mar, com os

valores obtidos através das medidas nos poços, e o resultado foi representado nas figuras 2.14 e 2.15, onde o eletrodo de corrente está projetado em ambos os perfis pela representação de uma cruz.



Figura 2.14: Equipotenciais no nível +40 m acima do nível do mar, para o aterramento no poço 11 (Parasnis, 1967)



Figura 2.15: Equipotenciais no nível +10 m acima do nível do mar, para o aterramento no poço 11 (Parasnis, 1967)

Na figura 2.15, foram representados, através de linhas tracejadas, os corpos de minérios necessários para explicar as equipotenciais obervadas. Sendo os dois mais importantes representados pelas letras C e G. O corpo que foi marcado com a "interrogação"seria o corpo de minério sobre o qual o estudo não tem informações concretas, mas seria necessário para explicar o espaçamento maior entre as linhas das equipotenciais. É possível observar que nesta imagem a centralização está ocorrendo na estrutura C, portanto pode-se concluir que o eletrodo de corrente locado no poço 33 levou a mapear a outra estrutura, a representada pela letra G.

## Modelos tridimensionais

A criação de modelos tridimensionais é extremamente útil para a interpretação de dados de um levamentamento utilizando o método mise-à-la-masse.

Para este levantamento, foi construído um modelo utilizando fios de cobre e folhas de plástico transparente de 1 mm de espessura. Cada folha de plástico representa um plano vertical de cada perfil.

Imagens como as representadas em 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.12 e 2.13 foram desenhadas na folhas de plásticos e furos foram realizados em pontos ondes os contornos (0, 100, ...mV) intersectavam os planos horizontais correspondentes. O fios de cobre foram utilizados para unir os buracos de mesmo potencial, no mesmo plano horizontal. O resultado desse engenhoso procedimento pode ser apreciado na figura 2.16.



Figura 2.16: Fotografia do modelo tridimensional potencial mise-à-la-masse do depósito de chumbo, zinco e cobre de Vindfall (Parasnis, 1967)

## **Observações** finais

As conclusões principais desta investigação foram resumidas, pelo autor, nos cinco fatores a seguir:

1. Realizar uma correlação entre diferentes partes de um corpo de minério é possível, através da introdução de carga elétrica em um aterramento e da medida de potencial em poços ou na superfície em outra região;

- 2. Diferentes corpos de minérios podem ser isolados através de medidas de mise-à-lamasse;
- O mergulho do corpo de minério pode ser determinado através de um levantamento mise-à-la-masse;
- 4. Se um número suficiente de poços estiver disponível, a forma e o mergulho de um minério podem ser mapeados de um nível para outro;
- 5. Em alguns casos, pode ser possível estimar a extensão da profundidade de um corpo de minério.

# DISCUSSÃO

A importância do trabalho desenvolvido por Parasnis (1967) é inegável para o estudo do método mise-à-la-masse, diante da quantidade de artigos encontrados, no levantamento bibliográfico de casos realizado, que citavam este trabalho como referência principal. Sendo este também o artigo mais antigo encontrado em toda a pesquisa elaborada para a produção deste material.

Diante dos fatores informados no parágrafo anterior, foi crucial a inclusão deste trabalho nos casos a serem aqui estudados. Além disso, este trabalho confirma, de forma bastante didática, o quanto o método mise-à-la-masse é eficiente para apresentar informações como forma e mergulho do corpo objeto de estudo, mesmo em situações em que fosse complicado encontrar essa informação através de outros métodos.

É necessário ainda pontuar a demonstração da comunicação entre diferentes métodos geofísicos, visto que neste caso foram realizados levantamentos eletromagnéticos, de resistividade elétrica e aplicando o método mise-à-la-masse.

Outra particularidade deste trabalho foi a aplicação do método em diferentes níveis de altura em relação ao nível do mar, algo só encontrado neste trabalho. A criação de um modelo tridimensional de forma física também é bastante curiosa, levando em consideração a comparação com as técnicas mais modernas realizadas em programas computacionais.

# 2.2 Aplicação do método mise-à-la-masse no mapeamento de um corpo de sulfeto

Na região de Gairloch, no nordeste da Escócia, foram realizados levantamentos, utilizando o método mise-à-la-masse, em superfície e em poços de perfuração para mapeamento de um corpo de sulfeto. No artigo apresentado por Bowker (1991), a análise qualitativa dos dados levou à localização de falhas que dividem o corpo de minério estudado, além da possibilidade de estabelecer uma correlação geológica entre os poços, determinando a continuidade do minério. Uma análise quantitativa também foi estabelecida, e, com isso, foi possível estabelecer maiores detalhes, como, por exemplo, as extensões laterais de cada bloco de minério.



Figura 2.17: Geologia e localização dos poços na região de Gairloch (Bowker, 1991)

Neste artigo, o arranjo utilizado fixava um eletrodo de corrente no interior do poço, em contato com o corpo de minério, enquanto o outro eletrodo de corrente foi fixado a uma considerável distância da região de mapeamento. Com relação aos eletrodos de potencial, um foi fixado em superfície, enquanto outro foi deslocado dentro do poço, gerando um perfil da diferença de potencial.

Analisando a figura 2.17, é possível verificar que a mineralização da região é excelente para uma investigação geofísica, uma vez que se trata de um corpo altamente condutivo e intersectado por diversos poços preexistentes. Os numéros circulados representam os blocos de mineralização e a tabela 2.1 esquematiza os poços que intesectam cada bloco de mineralização.

Para uma melhor análise do estudo que foi realizado nesta região, foram destacadas as interpretações geradas do levantamento realizado na região oeste do minérios e na área dos blocos 4 e 7, os principais blocos da região leste deste corpo.

Bloco Nº/Nome	Poços cortantes	
Região Oeste do Minério		
Gossan		
Gossan(2)		
Bloco 1	1	
Região Leste do Minério		
Bloco 4	4,5	
Bloco 7	7,8,9,10	
Bloco 11	11	
Bloco 3	3	

Tabela 2.1: Interseção entre os blocos de mineralização e os poços.

Fonte: Adaptada de Bowker (1991)

### Interpretação de dados do levantamento realizado no Bloco 4

A figura 2.17 e a tabela 2.1 mostram que o bloco 4 é cortado pelos poços de perfuração 4 e 5. Os levantamentos geofísicos, utilizando o método mise-à-la-masse, foram realizados com o um eletrodo de corrente fixado em contato com o minério, em ambos os poços, e os resultados obtidos podem ser verificados na figura 2.18. Entre os resultados obtidos, pode-se destacar as dimensões do corpo condutor sendo  $100 m \ge 75 m$ , largura de 15 m, mergulho de  $70^{\circ}$ , profundidade do topo do corpo a 43 m e resistividade da rocha hospedeira valendo  $667 \Omega.m$ , além de ser possível observar o final da mineralização bem abaixo do poço 5.

O levantamento realizado em superfície levou a um resultado expresso pela figura 2.19, sendo que o perfil obtido em superfície e o perfil obtido através do poço 4 formam um ângulo de aproximadamente 45° entre si, o que leva a uma variação em seus gradientes. Porém, a linha A, obtida através do levantamento no poço 4, pode ser projetada na linha B, obtida em superfície, o que demonstra que existe uma perpendicularidade entre esses resultados. Essa projeção mencionada está representada pela figura 2.20. A análise dessa projeção se torna interessante, uma vez que a seção vertical apresenta uma quantidade maior de dados.

### Interpretação de dados do levantamento realizado no Bloco 7

A figura 2.17 mostra que existe uma falha separando o bloco 4 do bloco 7, porém levantamentos superficiais com os eletrodos de corrente fixados em ambos os poços, 4 e 7, verificaram que existe um canal de corrente entre esses blocos, tornando seu comportamento diferente do esperado para dois corpos distintos.

Como as rochas hospedeiras em volta dos poços 8, 9 e 10 são extremamente não ho-



Figura 2.18: Seção dos resultados do Bloco 4 (Bowker, 1991)



Figura 2.19: Seção dos resultados do levantamento de superfície do Bloco 4 (Bowker, 1991)

mogêneas, incluindo uma grande porção de material de baixa resistividade, estes poços não foram de grande ajuda para este levantamento, restando apenas o poço 7 cortando este bloco de minério. Apesar das limitações encontradas, foram obtidos os possíveis valores no



Figura 2.20: Comparação entre os perfis da seção vertical e da seção de superfície (Bowker, 1991)

tamanho do corpo nos seus limites superior e inferior. Para o cálculo destes limites foram utilizados os valores máximo e mínimo de resistividade da rocha hospedeira de  $300 \Omega.m$  e  $1000 \Omega.m$ , e os valores ecnontrados estão registrados na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Dimensões de cada bloco condutor da região de Gairloch

Bloco Nº/Nome	Prováveis Dimensões $(m)$	Limites superior e inferior $(m)$		
Gossan	60x60x5	$60\mathrm{x}60\mathrm{x}3 < \mathrm{Dimens\tilde{o}es} < 60\mathrm{x}60\mathrm{x}6$		
1	28x28x5	$22.3\mathrm{x}22.3\mathrm{x}5 < \mathrm{Dimens\tilde{o}es} < 30,7\mathrm{x}30,7\mathrm{x}5$		
4	100x75x15	$100\mathrm{x}56\mathrm{x}15 < \mathrm{Dimens\tilde{o}es} < 100\mathrm{x}90\mathrm{x}15$		
7	240x240x4	$198 \mathrm{x} 198 \mathrm{x} 4 < \mathrm{Dimens\tilde{o}es} < 348 \mathrm{x} 348 \mathrm{x} 4$		

Fonte: Adaptada de Bowker (1991)

A análise da tabela permite concluir, que apesar dos blocos 4 e 7 não se comportarem como corpos distintos, eles realmente são corpos separados, uma vez que as suas dimensões são discrepantes.

## Interpretação de dados do levantamento realizado no Região Oeste

A região oeste desta zona de mineração é formada por três blocos de minérios principais. O bloco principal é o Gossan, corpo de sulfeto maciço, que apresenta um formato, aproximadamente, quadrado em superfície. O segundo bloco, o Gossan (2), apresenta condutividade menor que o Gossan, sendo ignorado e classificado apenas como uma continuação da mineralização, uma vez que sua baixa condutividade acarreta apenas em pertubarções nos dados dos levantamentos referente ao bloco principal. O terceiro bloco de minério é o bloco que é interceptado pelo poço 1.

A descontinuidade entre o Gossan e o bloco 1 pode ser verificada na comparação entre as figuras 2.21 e 2.22, que representam, respectivamente, o perfil obtido com o eletrodo de corrente dentro do poço 1 e o modelo obtido com o eletrodo de corrente no Gossan. Ambos os levantamentos foram realizados através do poço 1.



Figura 2.21: Perfil através do poço 1 com o eletrodo de corrente fixado no poço (Bowker, 1991)

As dimensões destes blocos também foram registradas na tabela 2.2, que contribui para a confirmação da descontinuidade entre os blocos, devido a diferença de dimensão entre o bloco 1 e o Gossan.

## Observações finais

A interpretação realizada neste artigo não deve ser considerada literalmente, uma vez que se tratou de um trabalho de modelagem com aproximações utilizando blocos retangulares. Contudo, essa aproximação em modelos mais retangulares se mostrou bastante eficiente.

Devido às limitações e suposições no processo de modelagem, a interpretação deste artigo deve ser usada apenas como um guia para a identificação da real geologia da área.



Figura 2.22: Perfil através do poço 1 com o eletrodo de corrente fixado no Gossan (Bowker, 1991)



Figura 2.23: Modelo obtido com um levantamento de superfície e o eletrodo de corrente fixado no Gossan (Bowker, 1991)

# DISCUSSÃO

Como a maior parte da aplicação do método mise-á-la-masse é realizada na área da mineração, pelo menos nos primórdios deste método, foi interessante apresentar outro artigo



Figura 2.24: Modelo obtido através de seções pelos poços 1 e 2, com o eletrodo de corrente no poço 1 (Bowker, 1991)

voltado para esta aplicação. Contudo, o trabalho desenvolvido por Bowker (1991) apresentou um novo ângulo para a questão, ao apresentar a possibilidade de mapear fraturas e descontinuidades utilizando-se do método mise-à-la-masse.

# 2.3 Delineação de uma pluma de contaminação em água subterrânea

O monitoramento da contaminação das águas subterrâneas sempre foi de fundamental importância. O método geofísico padrão de resistividade elétrica, com aquisição realizada em superfície, vem sendo usado com sucesso para reduzir o número de poços de monitoramento necessários para definir a migração de contaminantes em áreas de lençóis freáticos. O método mise-à-la-masse foi, originalmente, desenvolvido para mapear corpos de minérios com alta condutividade elétrica, desta forma, a sua aplicação no mapeamento da contaminação am água subterrânea seria empregado apenas para plumas de contaminação condutivas, contudo a maioria das plumas são relativamente condutivas, tornando as suas delineações apenas possíveis na existência de um contraste de condutividade entre a pluma e o meio que a cerca.

Em Osiensky (1997), as questões referentes a levantamentos para delineação de uma pluma de contaminação em água subterrânea são discutidas, bem como o fato da possibili-

dade de comparação da evolução desta pluma, uma vez que o levantamento inicial fornece uma linha de base, para que ensaios futuros, sob as mesmas condições, permitam uma comparação da alteração desta pluma de contaminação em função do tempo. O artigo apresentado por Osiensky (1997) conclui ainda que o método mise-à-la-masse permite calcular uma aproximação da localização do centro de massa da pluma de contaminação condutiva.

A utilização mais simples e direta do método mise-à-la-masse para investigação de plumas de contaminação envolve a identificação, primeiro, de regiões onde são eliminados resíduos, como, por exemplo, em lixões, lagoas, entre outros. Nessas possivéis fontes de contaminação do lençol freático, um único eletrodo de corrente elétrica pode ser locado diretamente em contato com a fonte de contaminação.

A modelagem tridimensional de um fluxo elétrico torna-se um desafio a medida que para estimar, em coordenadas cartesianas, um fluxo tridimensional esférico é necessário diversas camadas e células com pequenas diferenças finitas, tornando o desenvolvimento deste *grid* 3-D bastante desafiador. Com o objetivo de diminuir estes empecilhos, a fonte pontual de corrente elétrica pode ser tratada como um poço penetrando um aquífero confinado, se comportando como uma fonte de linha, o que reduz a um problema de duas dimensões.

O Campo Potencial Elétrico bidimensional estável, medido em superfície através do método mise-à-la-masse, foi estimado pelo autor deste artigo utilizando o código preexistente MODFLOW, levando em consideração ajustes para simular as condições de um fluxo elétrico esférico.

### Simulações em duas dimensões

O modelo bidimensional consistiu em um grid 101 X 101, com um espaçamento de 100 m, sendo o poço de injeção locado no centro deste grid (51, 51).

Considerando os ajustes necessários, os resultados obtidos pelo MODFLOW foram retradados na figura 2.25 através de círculos e comparados com a linha contínua que representa o esperado teoricamente. Desta forma, é possível concluir que os resultados gerados pelo MODFLOW apresentaram alta precisão com relação ao esperado teoricamente.

As condições iniciais utilizadas para estas simulações foram de um aquífero homogêneo e isotrópico com condutividade eletrica de  $\sigma = 0,01 S.m^{-1}$ , e representado como uma única camada confinada de 30 m de espessura. A condutividade elétrica da água que preenche este aquífero foi estimada em  $\sigma_a = 0,059 S.m^{-1}$ . Por fim, a variação na condutividade elétrica das plumas de contaminação nesta região ficou entre 2,059  $S.m^{-1}$  e 0,0592  $S.m^{-1}$ .

A tabela 2.3 representa as condições que foram utilizadas para gerar plumas hipotéticas utilizando o MODFLOW. O resultado alcançado foi representado na figura 2.26, que demonstra a relação da condutividade elétrica da pluma em função da distância longitudinal



Figura 2.25: Comparação entre o resultado teórico e a solução obtida pelo MODFLOW, sendo o resultado teoríco representado pela linha contínua e as medidas resultantes do MODFLOW respresentadas por círculos (Osiensky, 1997)

da fonte da pluma em metros. Esta figura caracteriza o decréscimo contínuo da condutividade elétrica com a distância da fonte na direção de migração da pluma. Apesar da tabela 2.3 e da figura 2.26 apresentaram a Pluma 1, ela não foi simulada.

Pluma	Extensão do pe-	Concentração ori-	Concentração final	Velocidade linear
	ríodo de simulação	ginal na fonte	na fonte $(mg/L)$	média $(m/ano)$
	(anos)	(mg/L)		
1	_	5000	_	_
2	2,0	20000	18403	158
3	4,0	20000	19173	158
4	6,0	20000	19237	158
5	12,0	20000	20000	95

Tabela 2.3: Condições utilizadas nos modelos para gerar as plumas de contaminação hipotéticas

Fonte: Adaptada de Osiensky (1997)

Com o intuito de realizar uma simulação mais completa, foi gerado um mapa de contorno base do potencial elétrico que seria medido no topo do aquífero, considerando um cenário ideal onde não existe contaminação presente no aquífero. Este resultado foi representado na figura 2.27.



Figura 2.26: Distribuição da concentração de cinco plumas bidimensionais (Osiensky, 1997)



Figura 2.27: Mapa de contorno simulado para campo potencial elétrico bidimensional do modelo ideal sem contaminação (Osiensky, 1997)

Utilizando o mapa de contorno da figura 2.27 como referência, foram, também, gerados os mapas contendo as interferências das plumas 2, 3, 4 e 5, mostrando a distorção do Campo Potencial Elétrico devido a presença das plumas e a direção das plumas no sentido Norte. As figuras 2.28, 2.29, 2.30 e 2.31 representam os resultados obtidos para cada pluma. Todos os quatro resultados mostram os contornos convergindo para um ponto entre o centro geométrico e o centro de massa para cada pluma, visto que as linhas de fluxo elétrico refratam quando passam de um meio para outro com diferentes valores de resistividade/condutividade, o que leva a distorção das equipotenciais.



Figura 2.28: Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 2 (Osiensky, 1997)



Figura 2.29: Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 3 (Osiensky, 1997)



Figura 2.30: Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 4 (Osiensky, 1997)

### Simulações em três dimensões

A modelagem 3D é complicada de ser realizada devido a limitação de memória dos computadores, uma vez que as infinitas condições teóricas só podem ser aproximadas através



Figura 2.31: Mapa de contorno simulado com a interferência da Pluma 5 (Osiensky, 1997)

da modelagem por diferenças finitas. Neste caso, foi utilizado um *grid* de 119 X 119, com distanciamento uniforme de 5 m e 22 camadas. As espessuras das camadas foram camada 1 = 1 m, camada 2 = 4 m, camadas 3 até 21 = 5 m e camada 22 = 495 m. O poço de injeção está localizado no centro da camada 1, na posição (60, 60).

As condições iniciais utilizadas para estas simulações foram de um aquífero homogêneo e isotrópico com condutividade eletrica de  $\sigma = 0,01 S.m^{-1}$ , e representado por 22 camadas totalizando uma espessura total de 595 m.

Cuidando para manter as mesmas condições utilizadas no calculo bidimensional, a modelagem 3D foi realizada de forma análoga e os resultados foram representados nas figuras 2.32 e 2.33. Onde a figura 2.32 representa o mapa de contorno ideal para uma situação sem contaminação, e a figura 2.33 representa o mapa gerado após a intereferência da pluma simulada. Os resultados observados conferem com os encontrados nas simulações bidimenionais, pois a pluma está migrando para o Norte e as equipotenciais apresentam uma concentração entre o centro de massa e o centro geométrico.

### **Observações** finais

As principais observações procedentes deste artigo estão listadas a seguir:

- 1. O método mise-á-la-masse pode estimar aproximadamente a localização o centro de massa de plumas de contaminação, através de simulações hipotéticas;
- 2. A maneira como o fluxo elétrico é refratado nas plumas faz com que o ponto de maior potencial elétrico ocorra próximo ao centro de massa da pluma;
- 3. A limitação apresentada pelo método mise-à-la-masse para alocar o centro de massa das plumas simuladas occorre devido, principalmente, a aproximação bidimensional



Figura 2.32: Mapa de contorno simulado para campo potencial elétrico tridimensional do modelo ideal sem contaminação (Osiensky, 1997)



Figura 2.33: Mapa de contorno em uma simulação 3D com a interferência de uma pluma de contaminação (Osiensky, 1997)

realizada de um sistema tridimensional.

# DISCUSSÃO

Osiensky (1997) apresenta uma nova aplicação para o método mise-à-la-masse, mostrando o seu uso em um contexto mais ambiental, ao demonstrar a possibilidade de delinear uma pluma de contaminação em águas subterrâneas e, até mesmo, acompanhar a evolução desta pluma.

Contudo, como o método mise-à-la-masse foi criado para aplicação no mapeamento de corpos de minérios condutivos, é necessário que a pluma de contaminação apresente um contraste de condutividade com o meio ao seu redor, para, de certa forma, comporta-se como um corpo condutor.

Interessante, também, a aplicação do método, neste contexto, tanto em um universo bidimensional, quanto em estudos tridimensionais, confirmando, mais uma vez a amplitude de possibilidades de uso do mise-à-la-masse.

# 2.4 Detecção de poluição originada de vazamento de esgoto

A análise de vazamentos no sistema de esgoto subterrâneo é de vital importância para questões ambientais, dado que estes vazamentos podem levar a contaminação de águas subterrâneas. Todavia, os métodos tradicionais utilizados para monitoramento dos sistemas de esgotos não são eficientes para localizar com precisão a origem de vazamentos. Sendo assim, em Wood e Palmer (2000), foram realizados testes para verificar a eficácia do método mise-àla-masse e do imageamento bidimensional de resistividade na locação da fonte de vazamento em um esgoto enterrado.

Neste contexto, o método mise-à-la-masse conseguiria detectar a continuidade elétrica entre o esgoto e o solo ao redor dos canos, de forma que, uma variação nesta continuidade apontaria para a região onde estaria ocorrendo um possível vazamento. O imageamento de resistividade mede a resistividade elétrica em função da profundidade, logo permitiria diminuir possíveis amibiguidades e apontar com mais segurança para a localidade da fonte de vazamento, se detectar uma diminuição de resistividade na profundidade onde se encontra o encanamento.

As aquisições deste artigo foram realizadas em quatro diferentes regiões da cidade de Sydney, na Australia, onde muitos dos tubos de esgotos utilizados foram instalados no início do século XX, sendo fabricados em argila, e, por isso, desenvolvendo rachaduras com o passar dos anos. Em todas essas quatro regiões estudadas, a profundidade do encanamento era menor que 2.5 m e a inclinação do terreno era aproximadamente uniforme, tornando a profundidade do encanamento consideravelmente constante.

Devido à presença de materiais sólidos dissolvidos na água, o esgoto apresenta uma baixa resistividade elétrica, num valor menor que  $10 \Omega.m$ , e a argila, material dos canos, apresentam alta resistividade elétrica, não interferindo em respostas de levantamentos elétricos geofísicos. Consequentemente, métodos elétricos seriam de excelente utilidade para levantamentos buscando alocar as fontes de vazamentos em sistemas de esgotos. Contudo, como se trata de uma área urbana, cercada por materiais excelentes condutores, levantamentos utilizando o método eletromagnético não foi viável, portanto foram realizadas aquisições utilizando o método mise-à-la-masse e o método da eletrorresistividade. No levantamento mise-à-la-masse, um eletrodo de corrente foi instalado dentro do esgoto, no interior do cano e o outro eletrodo de corrente foi locado a uma distância de 80 m da linha de pesquisa, sendo esta alocação um desafio, devido ao perímetro urbano da pesquisa e o constante trânsito de automóveis e pedestres. O eletrodo de potencial que realizou as medidas da resistividade aparente foi movido, em superfície, ao longo da linha de direção do cano.

Em uma situação ideal, na qual o sistema de esgoto não apresentasse vazamentos, apenas uma pequena corrente cruzaria os canos na direção do solo, de forma que a resposta esperada seria um crescimento linear da resistividade em relação à distância entre os eletrodos, conforme a figura 2.34. Porém, a existência de vazamentos, permitiria a passagem de materia condutivo do esgoto para o solo, o que apresentaria um decaimento na resistividade aparente medida em determinado espaço, conforme o retratado na figura 2.35.



Figura 2.34: Resposta esperada para um levantamento mise-à-la-masse sem vazamento (Wood e Palmer, 2000)



Figura 2.35: Resposta esperada para um levantamento mise-à-la-masse com vazamento (Wood e Palmer, 2000)

Os levantamentos de eletrorresistividade realizados utilizaram o arranjo Wenner, com um espaçamento de 1 m, sendo realizados incrementos de 1 m até um total de máximo de 6 m, a depender da profundidade do encanamento. Os resultados foram invertidos utilizando o programa RES2DINV, que proporcionou estimar uma distribuição da resistividade em subsuperfície, através de pseudo-seções.

A correlação entre uma medida de baixa resistividade pelo método mise-à-la-masse, e uma região de baixa resistividade, na profundidade do encanamento, através do método da eletrorresistividade, é um forte indício da migração do esgoto para fora do encanamento.

## Modelos Conceituais

Com a finalidade de auxiliar a interpretação das respostas geofísicas obtidas, uma série de modelos teóricos foram desenvolvidos para formar uma estrutura de possibilidades para as ocorrências de vazamento e suas respostas geofísicas. Abaixo, são descritos quatro destes modelos:

- Modelo 1 Sem ocorrência de vazamento. A resposta do mise-à-la-masse será semelhante a figura 2.34, enquanto a pseudo-seção de resistividade representará apenas a geologia local.
- Modelo 2 A migração do material vazado ocorre ao longo da trincheira onde o cano foi locado. A resposta do mise-à-la-masse mostrará um extensivo decaimento na resistividade, cuja extensão depende da distância de alcance do material vazado. A pseudo-seção de resistividade indicará uma extensa região de baixa resistividade, na profundidade do encanamento, na região do vazamento.
- Modelo 3 Uma rachadura no encanamento foi selada pela expansão do solo, prevenindo novos vazamentos. As respostas irão depender da quantidade de material que vazou antes da rachadura ser selada. Porém, é possível considerar o vazamento de material suficiente para que ocorra a expansão do solo, de forma que o método mise-à-la-masse consegue detectar a região. Contudo, esta região não deve ser grande o suficiente para ser localizada nas pseudo-seções de resistividade.
- Modelo 4 Existe uma rachadura no encanamento, e o vazamento ocorre de forma localizada, devido a impermeabilidade do solo. A resposta do mise-à-la-masse será semelhante a figura 2.35. Se este vazamento ocorreu com intensidade suficiente para umedecer o solo da região. A pseudo-seção de resistividade indicará uma região de baixa resistividade, a depender da resistividade do solo vizinho.

## Resultados

Os levantamentos foram realizados em duas áreas de um terreno argiloso, área C1 e área C2, enquanto os demais levantamentos foram realizados em terrenos de solo arenoso, área S1 e área S2. As áreas C1 e S1 foram locadas em uma região aberta, enquanto as áreas C2 e S2 trataram de encanamentos passando por baixo de estradas.

## Resultados da Área C1

O resultados obtidos através do levantamento mise-à-la-masse, nessa região, estão representados pela figura 2.36. Esta resposta mostra um crescimento linear resistividade elétrica em função da distância, ao longo do comprimento do cano, o que indica a inexistência de vazamento ou a existência de pequenos vazamentos. Contudo, como é esperado que os efeitos do vazamento seja sutil, foram realizadas medidas transversas paralelas, com 0.5 m de distância entre elas, para identificar possíveis respostas correlatas. A figura 2.37 mostra os gradiente horizontais dessas transversais, apontando respostas correlatas nas distâncias 20.25 me 21.5 m. A variação nestes pontos, podem ser justificadas pela queda na resistividade local ou por alguma inomogeneidade lateral presente.



Figura 2.36: Resposta mise-à-la-masse na região C1 (Wood e Palmer, 2000)



Figura 2.37: Gradiente mise-à-la-masse na região C1 (Wood e Palmer, 2000)

A pseudo-seção de resistividade auxilia para sanar qualquer dúvida sobre as anomalias observadas nas respostas do mise-à-la-masse, uma vez que a figura 2.38 mostra uma região de baixa resistividade, na profundidade do encanamento, centradas nas distâncias 16 m, 21.5 m e 24 - 25 m.



Figura 2.38: Pseudo-seções de resistividade na região C1 (Wood e Palmer, 2000)

Na distância de 16 m, os resultados do mise-à-la-masse não mostram uma correlação, o que pode remeter a um cenário como o descrito no modelo 4 ou não. Observações da região, permitem a análise de que nas três distâncias destacadas foi observada a presença de uma espécie de grama denominada Kikuyu, sendo que essa grama pode estar retendo a umidade e, por consequência, diminuindo o valor da resistividade ao longo do encanamento, mas não nas transversais. Desta forma, é possível concluir que a chance da fonte das anomalias observadas serem vazamentos é alta.

## Resultados da Área S1

O resultados do levantamento mise-à-la-masse, representado pela figura 2.39, indica uma larga variação da resposta esperada ideal entre 4 e 14 m, centrada por volta de 7 m. Essa variação é característica do modelo 2.

A pseudo-seção, reproduzida na figura 2.40, está correlacionada com a anomalia encontrada na resposta do mise-à-la-masse, uma vez que existe uma região de baixa resistividade indo até a distância de 11 à 13 m. É possivel notar ainda, o quanto esta região pontual apresenta uma resistividade bastante inferior a sua vizinhança, o que colabora ainda mais com confirmação desta região como uma área de vazamento.



Figura 2.39: Resposta mise-à-la-masse na região S1 (Wood e Palmer, 2000)



Figura 2.40: Pseudo-seções de resistividade na região S1 (Wood e Palmer, 2000)

## Resultados da Área C2

A região C2 apresenta os canos do esgoto abaixo de uma estrada, sendo que existem encanamento de água e outras estruturas paralelas ao sistema de esgoto. Esta região ainda sofre com a influência de uma linha ferroviária eletrificada. Desta forma, uma grande quantidade de perturbações influeciaram os levantamentos.

A resposta mise-à-la-masse, da figura 2.41, indica uma resposta similar a resposta ideal para uma região sem vazamento, contudo, devido a limitações espacial, não foi possível realizar levantamentos transversais para sanar essa ambiguidade, como feito na área C1.

A pseudo-seção de resistividade, da figura 2.42, indica valores de baixa resistividade, na profundidade do encanamento, entre as distâncias de 7 e 32 m, o que não está correlacionado com a resposta do mise-à-la-masse, tornando os resultados altamente ambíguos. Consequentemente, não podemos inferir nenhum resultado que indique vazamento.



Figura 2.41: Resposta mise-à-la-masse na região C2 (Wood e Palmer, 2000)



Figura 2.42: Pseudo-seções de resistividade na região C2 (Wood e Palmer, 2000)

## Resultados da Área S2

A área S2 apresenta limitações e resultados análogos à área C2, com o diferencial de ser um terreno arenoso. As figuras 2.43 e 2.44 representam os resultados obtidos com os levantamentos realizados.

## **Observações** finais

Abaixo, estão enumeradas as principais conclusões:

- 1. O método mise-à-la-masse e o método da eletrorresistividade, utilizados de forma conjunta, podem detectar vazamentos em sistemas de esgoto;
- 2. Em áreas com grande variação de superfícies, como na situação de canos abaixo de uma estrada, os resultados são bastanta ambíguos;



Figura 2.43: Resposta mise-à-la-masse na região S2 (Wood e Palmer, 2000)



Figura 2.44: Pseudo-seções de resistividade na região S2 (Wood e Palmer, 2000)

- 3. A melhor aplicação do método foi na área S1, de solo arenoso, devido a grande diferença de resistividade entre o solo saturado e insaturado nesta situação;
- 4. Os resultados na área C1 mostram que o método funciona para solos argilosos, porém pode ser necessário a aquisição de transversais paralelas.

# DISCUSSÃO

O artigo aqui discutido apresenta uma nova aplicação do método mise-à-la-masse na questão ambiental, uma vez que Osiensky (1997) realizou levantamentos deste método, em conjunto com estudos de eletrorresistividade, para mapear regiões de vazamento em um encanamento de esgoto. Essa aplicação torna-se interessante devido ao fato do próprio esgoto se comportar como corpo condutivo, tornando possível a utilização do mise-à-la-masse, além de mostrar a possibilidade de uso em áreas urbanas, onde outros métodos teriam dificuldades.

# 2.5 Delineação da migração de um traçador em um basalto parcialmente saturado

O trabalho desenvolvido em Nimmer e Osiensky (2002) buscou analisar a migração de um traçador condutivo injetado em uma região basáltica fraturada e parcialmente saturada. A metodologia empregada, utilizando o método mise-à-la-masse, apresentou um eletrodo de corrente, colocado no fundo do poço de injeção, de forma a energizar o traçador, que neste caso foi o cloreto de potássio. Este traçador foi injetado, de forma constante, por um período de 34 dias, com uma razão média de 10 L/dia.

A análise da delineação do caminho preferencial de fluxo em meios fraturados é essencial para estratégias em situações que seja necessário esforços para conter problemas de contaminação em subsuperfície. Contudo, os métodos padrões utilizados, normalmente, são invasivos, caros e envolvem a perfuração em diversos pontos da área de estudo. Desta forma, os métodos geofísicos elétricos são uma alternativa menos onerosa e menos invasiva de se realizar o mesmo estudo.

A área de estudo em questão está localizada na Universidade de Idaho, USA, no campus de Moscow, Idaho, ao longo costa leste do Rio Columbia, onde existem duas formações de basalto. As aquisições foram realizadas na região mais superior da formação Wanapum, que possui uma idade de 14.5 milhões de anos. O basalto desta região apresenta fraturas, tipicamente, preenchidas por argila, sendo a região superior das fraturas mais preenchida que as regiões inferiores, devido ao intemperismo do basalto afetar mais as regiões superficiais.

O experimento total levou um período de 173 dias para ser concluído, usando o método mise-à-la-masse para rastrear uma pluma do traçador no basalto fraturado, onde o período de aquisição consumiu 34 dias desse total. Neste experimento, um poço de injeção centrado, com 0.15 m de diâmetro e profundidade máxima de 4575 m abaixo da superfície, foi perfurado na região de interesse, conforme a figura 2.45. Um eletrodo de corrente foi então alocado no interior central deste poço, a uma altura de 10 cm acima do fundo do poço.

A figura 2.45 representa, ainda, o grid 15 X 15, de 224 eletrodos de potencial, utilizado no levantamento, uma vez que, as medidas de potencial elétrico foram realizadas usando um arranjo fixo de eletrodos como demonstrado no esquema. Todos os eletrodos foram mantidos no mesmo local no decorrer de todo o levantamento, sendo que o eletrodo de potencial, usado como referência, foi aterrado a uma distância de 74.5 m a oeste do poço de injeção. Para finalizar as pontuações sobre este arranjo, o eletrodo de corrente, atuante como sumidouro, foi situado ao sudoeste do poço, numa distância de 62.4 m, não podendo se alocado ao infinito por restrições do terreno.

No início, o poço foi preenchido com 34.8 L de solução de cloreto de potássio, formando



Figura 2.45: Mapa de locação do poço de injeção e dos eletrodos para a análise do comportamento do traçador (Nimmer e Osiensky, 2002)

uma coluna de 1.91 m da solução de traçador condutivo. Esse nível da solução do traçador foi mantido durante todo o experimento, totalizando um totatl de 342 L de solução do traçador injetada continuamente durante 34 dias, numa razão, aproximadamente, constante de 10 L/dia.

Durante o período de 34 dias que o traçador foi injetado, as medidas foram realizadas seis vezes. A primeira medida foi realizada 0.83 dias após o começo da injeção do traçador, e as medidas que serviram como base foram realizadas 5 dias antes do inicio da injeção. Para cada uma das medidas realizadas, foi elaborado um mapa de contorno da razão entre a medida do potencial elétrico/medida de base do potencial, conforme a equação 2.1, onde  $V_{rt_i}$  representa a razão do potencial elétrico/medidas de base no período  $t_i$ ,  $V_{t_i}$  é o potencial elétrico no período  $t_i$ ,  $V_{t_0}$  é o potencial elétrico utilizado como base no tempo  $t_0 = 0$ , e *i* é o período da medida que vai de 1 a 6.

$$V_{rt_i} = \frac{V_{t_i}}{V_{t_0}} \tag{2.1}$$

A figura 2.46 é o mapa de contorno das medidas de base do potencial elétrico ( $t = t_0 = 0 \, dias$ ), em milivolts. Este mapa apresentou uma anomalia de condutividade linear ao norte da região. Como a anomalia encontrada não era esperada, escavações foram realizadas, nesta região, após as medidas do mise-à-la-masse terem sido realizadas. Essas escavações encontraram uma tubulação de aço percorrendo a região a uma profundidade de 1 m. A presença de anomalias condutivas também explica o fato das equipotenciais não estarem centradas no poço de injeção.

Após o fluído traçador condutivo ser inserido no poço, a primeira medida foi realizada logo em seguida, e o mapa de contorno foi representado pela figura 2.47, que mostra a variação na distribuição de corrente com relação as medidas de base. Já é possível notar a



Figura 2.46: Mapa de contorno das medidas de base do Potencial Elétrico ( $t_0 = 0$ ) (Nimmer e Osiensky, 2002)

formação de uma pluma do traçador, contudo, no período  $t_1 = 0.83d$ , apenas uma média de 10 L do traçador foi injetado. Desta forma, é mais viável avaliar esta anomalia como resultante das fraturas preenchidas por argila. Neste mapa, também, é possível verificar a anomalia referente à tubulação que corta a região mapeada.



Figura 2.47: Mapa de contorno dos valores de  $V_{rt_{0.83d}}$  (Nimmer e Osiensky, 2002)

As anomalias apresentadas na figura 2.47 foram formadas, também, porque o poço de injeção preenchido se comportou como uma fonte de corrente de linha vertical em compração com a fonte pontual da figura 2.46. Por esta razão, como todas as outras medidas foram realizadas com o poço mantendo o seu nível de preenchimento, foi mais viável utilizar  $t_1 = 0.83d$  como a nova medida de base nos cálculos das razões para as medidas de  $t_2$  a  $t_6$ .

Dados subsequentes foram adquiridos para os períodos  $t_2 = 3d$ ,  $t_3 = 11d$ ,  $t_4 = 17d$ ,  $t_5 = 25d e t_6 = 34d$ . Os mapas apresentados nas figuras 2.48, 2.49, 2.50, 2.51 e 2.52 mostram

o efeito que a pluma do traçador apresentou sobre a distribuição do potencial elétrico em relação ao tempo corrido. Porém, esses efeitos apresentaram variações observadas menores que 5%. Contudo, a variação mais dramática, que ocorreu antes de  $t_5$ , foi verificada ainda em  $t_6$ , o que comprova que essa mudança foi real e pode ser atribuída à pluma do traçador condutivo.



Figura 2.48: Mapa de contorno dos valores de  $V_{rt_{3d}}$  (Nimmer e Osiensky, 2002)



Figura 2.49: Mapa de contorno dos valores de  $V_{rt_{11d}}$  (Nimmer e Osiensky, 2002)

Os mapas de contornos dos períodos  $t_2 = 3d$ ,  $t_3 = 11d$  e  $t_4 = 17d$ , representados respectivamente pelos mapas 2.48, 2.49 e 2.50, mostram anomalias mais altas na região oeste do poço de injeção, o que pode indicar a ativação de fraturas preenchidas por argilas, ao entrar em contato com a solução do traçador. A evolução da pluma do traçador apresentada nas figuras 2.51 e 2.52, que representam, respectivamente, os períodos  $t_5 = 25d$  e  $t_6 = 34d$ , ainda mostram a presença das anomalias das argilas ativadas presentes nas fraturas a oeste



Figura 2.50: Mapa de contorno dos valores de  $V_{rt_{17d}}$  (Nimmer e Osiensky, 2002)



Figura 2.51: Mapa de contorno dos valores de  $V_{rt_{25d}}$  (Nimmer e Osiensky, 2002)



Figura 2.52: Mapa de contorno dos valores de  $V_{rt_{34d}}$  (Nimmer e Osiensky, 2002)

do poço, bem como mostram novas anomalias emanando do poço de injeção, ao norte e sul imediatos do poço, representados pelas setas na figura 2.51. Essas novas anomalias podem ser explicadas por parte da pluma do traçador migrando para a região de fraturas apresentadas na figura 2.47. É válido notar que, nestes dois últimos mapas, a anomalia referente a tubulação enterrada voltou a aparecer.

## Síntese

Ao final do artigo, os autores optaram por apresentar um resumo da atividade realizada, ao invés de apresentar conclusões ou observações finais. Segue abaixo, a síntese apresentada:

- Medidas foram realizadas, utilizando o método mise-à-la-masse, durante um período de 34 dias, injetando um traçador num poço radial em uma região de basalto fraturado e parcialmente saturado;
- 2. Mudanças na distribuição da superficie potencial elétrica, nos primeiros 17 dias, mostraram anomalias na região oeste do poço referente ao contato do traçador com a argila que preenche as fraturas desta região;
- 3. Anomalias que aparenceram entre os dias 17 e 34, ao norte e sul do poço de injeção, delinearam o tamanho e a forma da pluma em evolução do traçador.

# DISCUSSÃO

Nimmer e Osiensky (2002) confirma a aplicabilidade do método mise-à-la-masse na delineação da migração de determinado fluido em uma zona fraturada, apresentando uma nova técnica para a realização deste tipo de experimento. Neste artigo, de forma semelhante ao apresentado em Osiensky (1997), uma solução salina se comportou como o corpo condutor e toda a evolução da migração desta solução pôde ser observada através do mise-à-la-masse.

# 2.6 Estabelecimento da extensão lateral de fraturas em rochas

Próximo da cidade de Haiderabade, na Índia, encontra-se uma área geológica composta de rochas cristalinas, principalmente por granito, onde águas subterrâneas estão confinadas em fraturas nessas rochas. Nesta região, 25 poços foram perfurados com o objetivo de estudar as condições deste aquífero fraturado. Na pesquisa elaborada por Kumar et al. (2003), investigações utilizando o método mise-á-la-masse e o método do potencial espontâneo foram
realizadas em cinco dos vinte e cinco poços preexistentes, com o objetivo de delinear a extensão lateral das fraturas existentes nesta localidade.

A figura 2.53 é uma representação da localização dos poços na região de interesse, sendo que todos os 25 poços estão representados por círculos, os poços que ainda estavam sendo explorados estão marcados por triângulos, os poços onde foram realizadas as medidas de miseà-la-masse e de potencial espontâneo estão representado por quadrados e os xis demarcam os limites da bacia hidrográfica da região pertinente. As medidas realizadas foram nos poços numerados como 208, 219, 252, 256 e 265, sendo que dois desses ainda estão sendo utilizados na exploração de água subterrânea (252 e 265).



Figura 2.53: Mapa da localização dos poços na região estudada (Kumar et al., 2003)

Os 25 poços existentes foram criados para levantamentos geofísicos elétricos realizados anteriores à pesquisa de Kumar et al. (2003), e eles foram perfurados com o objetivo de obter informações sobre a litologia de subsuperfície, principalmente para encontrar as fraturas da região. Fraturas foram interceptadas por alguns desses poços, sendo cinco deles escolhidos para serem realizados estudos utilizando o método mise-à-la-masse e o método do potencial espontâneo.

Para a utilização do método mise-à-la-masse, um eletrodo de corrente foi acomodado no interior do poço, abaixo do nível do lençol freático, enquanto o outro eletrodo de corrente foi alocado a uma distância grande o suficiente para ser desprezada. Com relação aos eletrodos de potencial, um eletrodo foi colocado numa grande distância do poço, para servir como eletrodo de referência, enquanto o outro se moveu tomando as medidas do potencial elétrico seguindo um *grid* padrão, conforme a figura 2.54. As transversais apresentadas nesse padrão apresentam uma distância de 4 m entre si, e o número de transversais foram limitados devido as limitações espaciais ao redor de cada poço.



Figura 2.54: Padrão utilizado para as medidas utilizando o método mise-à-la-masse (Kumar et al., 2003)

As medidas de potencial espontâneo, também, foram realizadas através de um grid padrão, com o objetivo de ser possível uma correlação com os resultados obtidos utilizando o mise-à-la-masse. Desta forma, as medidas, também, foram realizada em transversais distantes 4m entre elas. Para cada poço, um eletrodo de potencial foi mantido fixo, funcionando como uma estação base, ao mesmo tempo que o outro eletrodo de potencial percorria o griddemarcado realizando a medição.

### Poço 219

As sondagens elétricas verticais que foram realizadas antes da perfuração dos poços, mostrou que o embasamento deveria estar a uma profundidade de 16, 4 m. Contudo, a resistividade apresentada por este embasamento não era alta, de forma que é esperado a existência de fraturas neste embasamento, por isso a perfuração deste poço foi realizada até a profundidade de 42 m. Na perfuração deste poço, foi encontrada água na profundidade de 14, 32 m em uma camada de granito parcialmente intemperizado. Pequenas fraturas foram encontradas entre 18, 29 m e 22, 86 m. Numa profundidade entre 22, 86 m e 36, 06 m, foi encontrado granito

fraturado. A produção de água aumentou bastante entre as profundidades de 32 m e 33, 4 m, indicando a intercepção com fraturas. O nível estático da água neste poço é 11,98 m. A figura 2.55 apresenta a litologia de todos os poços estudados, sendo possível verificar estas pontuações acima sobre o poço 219.



Figura 2.55: Litologia dos poços estudados (Kumar et al., 2003)

Para o propósito de realizar medidas referentes ao mise-à-la-masse, um eletrodo de corrente foi posicionado numa profundidade abaixo de 22 m, resultando nas medidas representadas pelo mapa de contorno da figura 2.56. Apenas três transversais poderam ser registradas, com a central cruzando o poço. A análise do mapa permite verificar um alongamento dos contornos das equipotenciais na direção N-S, o que pode indicar fraturas preenchidas com água. As medidas de potencial espontâneo apresentaram altos e baixos ao longo das anomalias do mise-à-la-masse, corroborando os resultados.

### Poço 252

A litologia deste poço está retratada na figura 2.55, tendo ele também sido perfurado até 42 m, e foi encontrada água em fraturas nas profundidades entre 19,73 e 21,34 m e, novamente, entre 29,87 e 33,53 m, com o nível estático da água em 19,25 m. Neste poço, o eletrodo de corrente foi posicionado numa profundidade abaixo de 30 m.

A figura 2.57 mostra as equipotenciais resultantes do levantamento mise-à-la-masse, por sua vez, a figura 2.58 representa o mapa de contorno resultante do potencial espontâneo neste poço. O mapa das equipotenciais do mise-à-la-masse apresenta uma anomalia na região mais



Figura 2.56: Mapa das equipotenciais do poço 219 (Kumar et al., 2003)

ao leste do poço, sugerindo alguma conectividade com esse alto de condutividade. Contudo o mapa do potencial espontâneo não apresenta nenhuma correlação com a anomalia observada.



Figura 2.57: Mapa das equipotenciais do poço 252 (Kumar et al., 2003)

# Poço 256

Observando a figura 2.55 e com as informações obtidas durante a perfuração, foi observada a existência de uma camada de granito bastante intemperizado até uma profundidade de 12, 6 m, seguido de um granito intemperizado até 18 m. A camada seguinte seria de um granito fraturado, com uma espessura de 6 m, sendo que o poço começou a produzir água ao alcançar a profundidade de 19 m, e o nível estático da água, neste poço é 12, 85 m. Neste caso, o eletrodo de corrente foi posicionado numa profundidade abaixo de 20 m. As medidas obtidas mostraram uma anomalia na direação E-W, indicando a extensão das fraturas, conforme a figura 2.59.



Figura 2.58: Mapa de contorno resultante do Potencial Espontâneo no poço 252 (Kumar et al., 2003)



Figura 2.59: Mapa das equipotenciais do poço 256 (Kumar et al., 2003)

## **Poço 265**

Este poço foi perfurado em uma profundidade acima de 42 m, e encontrou água num aprofundidade de 23 m, possuindo nível estático da água em 21, 18 m. As perfurações, estudos e a figura 2.55 mostram a presença de pequenas fraturas entre 15, 84 e 32, 90 m, e um granito fraturado entre 32, 90 e 37, 50 m. Com estas considerações, o eletrodo de corrente foi colocado em uma profundidade abaixo de 37 m.

O mapa do contorno das equipotenciais do mise-à-la-masse, representada na figura 2.60, mostra uma nomalia na direção N-S, indicando a extensão das fraturas. Este mapa apresenta ainda 3 outros poços perfurados na vizinhança do poço central, representados no mapa como BW-1, BW-2 e BW-3. Os poços BW-1 e BW-2, que estão na direção N-S em relação ao poço, interceptaram fraturas na mesma profundidade do poço 265, comprovando a exntensão das fraturas nesta direção. Contudo, o poço BW-3, que está na direção noroeste do poço,



não encontrou o mesmo resultado, o que confirma que as fraturas se extendem, apenas, na direção N-S.

Figura 2.60: Mapa das equipotenciais do poço 265 (Kumar et al., 2003)

### **Poço 208**

O poço 208 é o mais extenso entre os poços estudados, tendo sido perfurado até uma profundidade acima de 45 m, porém não interceptou nenhuma fratura e estava seco no período da perfuração. Todavia, um dia após a perfuração, água começou a infiltrar neste poço, formando um nível de água na profundidade de 18, 3 m.

A litologia do poço 208, indicada pela figura 2.55, mostra a existência de uma camada de granito intemperado até a profundidade de 17 m, seguida por uma camada de rocha maciça. O eletrodo de corrente foi locado em uma profundidade abaixo de 30 m, e os resultados do levantamento mise-á-la-masse e do levantamento de potencial espontâneo estão representados, respectivamente, nos mapas das figuras 2.61 e 2.62.



Figura 2.61: Mapa das equipotenciais do poço 208 (Kumar et al., 2003)



Figura 2.62: Mapa de contorno resultante do Potencial Espontâneo no poço 208 (Kumar et al., 2003)

Neste caso, foi possível a implantação de cinco transversais, e o mapa de contorno das equipotenciais apresentaram um comportamento concêntrico, sem distorções, o que confirma a questão da não existência de fraturas. No entanto, o mapa do potencial espontâneo apresenta anomalias na direção oeste do poço que pode respresentar pequenas fraturas na região.

# Conclusões

Com relação ao poço 219,que apresentou água tanto numa camada fraturada como numa camada intemperizada, uma anomalia foi observada ao redor do poço, na direção N-S.

O poço 252 apresentou fraturas preenchidas por água em duas camadas distintas, além de uma anomalia no mapa de contorno das equipotencias confirmando a extensão da fraturas em questão.

No poço 256, foi encontrada água numa porfundidade abaixo de 19 m numa camada fraturada, e o resultado, proveniente da aquisição utilizando o método mise-à-la-masse, apresentou uma anomalia na direção E-W.

O melhor resultado encontrado, através do método mise-à-la-masse, foi no poço 265, o que deve-se creditar ao fato deste poço encontrar fraturas de uma profundidade de 15 até 37 m, especialmente as fraturas entre 32,90 e 37,50 m, que se tratam de fraturas bem desenvolvidas.

O poço 208 não apresentou anomalias, por ser um poço seco, sem fraturas. Porém as medidas do mise-à-la-masse e do potencial espontâneo, mostraram evidências da existência de pequenas fraturas próximas ao poço.

É notório que as anomalias são bastante evidentes nos quatro casos em que os poços interceptaram fraturas. Desta forma, pode-se concluir que a técnicas do método mise-ála-masse, em conjunto com o método do potencial espontâneo, auxiliam na delineação da extensão de fraturas em rochas.

# DISCUSSÃO

Kumar et al. (2003) apresentou uma aplicação interessante do método mise-à-la-masse, ao realizar as medidas em diversos poços e retirar informações importantes através da correlação entre as medidas observadas. Desta forma, foi possível a delineação de fraturas na região de estudo.

Novamente, a relação entre os métodos geofísicos foi necessária, com a utilização do método do potencial espontâneo em conjunto com o mise-à-la-masse. Além da existência de informações sobre a região obtidas através de sondagens elétricas verticais, sondagens estas que proporcionaram a estrutura física para as aquisições realizadas por Kumar et al. (2003), uma vez que os poços foram perfurados para as sondagens elétricas verticais.

# 2.7 Rastreamento do fluxo de água subterrânea

A pesquisa desenvolvida por Pant (2004) buscou analisar a direção e velocidade do fluxo da água subterrânea, entre dois poços, na região do projeto de usina hidrelétrica em Marsyangdi, no Nepal. Para tanto, foi injetada, ininterruptamente, uma solução concentrada salina, em ambos os poços, numa razão de 0,75 litros por minutos, em uma profundidade abaixo do nível do lençol freático. As medidas de potencial foram realizadas, em superfície, para ambos os poços e, assim, foi possível verificar a velocidade do fluxo das águas subterrâneas.

A água salgada, que foi injetada nos poços, irá formar uma pluma na direção do fluxo das águas subterrâneas, contudo, também sofrerão os processos de dispersão e difusão. Por causa destes processos mencionados, a solução salina, também, "caminhará"nas direções transversais e oposta à direação do fluxo do lençol freático, e na direção do eixo do poço, o que afetará as medidas iniciais. Após algumas horas, a difusão e a dispersão se estabilizarão na direção oposta ao fluxo da água subterrânea, porém continuará a afetar de certa forma as medidas realizadas.

O experimento realizado neste artigo levou em consideração as seguintes presunções:

- 1. A solução salina utilizada é um perfeito corpo condutor, em comparação com as rochas da formação ao seu redor.
- 2. A concentração de água salgada está relativamente perto da superfície, de forma que as medidas tomadas em superfície são, aproximadamente, iguais as medidas de potencial

da solução salina. Portanto, a monitorização do movimento desta concentração pode ser realizado em superfície.

A região de interesse está localizada no distrito de Lamjung, na região Oeste do Nepal, onde está localizado um projeto da Hidrelétrica de Marsyangdi, conforme a figura 2.63. Esta região já tinha sido, previamente, investigada através de diversas sondagens e perfils de resistividade elétrica. Os poços, utilizados na aquisição de dados no experimento em questão (DS-2 e CH-4), foram então alocados na margem esquerda do Rio Marsyangi, conforme a figura 2.63.



Figura 2.63: Mapa da localização onde foi realizado o experimento (Pant, 2004)

O poço DS-2 penetrou a subsuperfície até uma profundidade de 75 m, sendo revestido de aço galvanizado até 48 m, encontrando o embasamento (Quartzito) na profundidade de 58, 5 m, e o nível de água se estabilizando em 30 m. O poço CH-4, por sua vez, foi perfurado até 27 m e revestido por PVC, em uma região abaixo do poço DS-2, terminando abaixo do

embasamento, e o nível da água subterrânea observado foi de 13, 4 m. Para ambos os poços, não foram detalhadas informações sobre a litologia, sendo apenas distintos o embasamento e a camada de sobrecarga. Contudo o Quartzito, característico do embasamento, se apresentava altamente fraturado e, portanto, com uma alta permeabilidade.

Os níveis do lençol freático encontrados nos poços apresentavam um padrão que indicava uma inclinação na direção do rio, o que leva a crer que as águas subterrâneas descarregavam no rio. Contudo, nem todos os poços corroboram com esta premissa. O poço CH-4, por exemplo, apresenta um nível de água (587, 2m) abaixo do nível do rio na região (589m), o que mostra que o poço deve estar recebendo água do rio e não o contrário.

## Poço DS-2

A figura 2.64 apresenta o esquema utilizado para os eletrodos e os perfis ao redor do poço DS-2, enquanto a figura 2.65 mostra uma visão esquemática da configuração utilizada. Neste experimento, cubos de sal foram inseridos diretamente no poço e uma concentração salina foi injetada, de forma contínua, numa vazão de 0,75 litros por minuto, um valor baixo para não interferir no fluxo natural do lençol freático. O revestimento galvanizado do poço atuou como o eletrodo de corrente.



Figura 2.64: Esquema dos perfis no poço DS-2 (Pant, 2004)

Para encontrar a direção do fluxo das água subterrâneas, um eletrodo de potencial base foi fixado em uma localidade, onde se imaginava ser oposta ao fluxo das águas, e dois eletrodos de referência, N1 e N2, foram colocados na direção do fluxo, a distâncias fixas do



Figura 2.65: Visão esquemática do experimento no poço DS-2 (Pant, 2004)

poço, respectivamente, de 40 m e 80 m.

A injeção de cubos de sal e a injeção contínua da solução salina começaram às 13:30, em 21 de dezembro de 1999 e foram concluídas em 31 de dezembro de 1999, às 18:30. Os resultados do monitoramento das equipotenciais para os eletrodos de referência N1 e N2 estão representados nas tabelas 2.4 e 2.5.

O tempo decorrido após a injeção da solução salina e a distância alcançada pela equipotencial para o eletrodo de corrente remoto B' foi plotado nas figuras 2.66 e 2.67, com relação aos eletrodos de potencial de referência N1 e N2, respectivamente. Essas figuras mostram a predominância das linhas da direção de fluxo ao longo do perfil 2.

A figura 2.68 representa um gráfico sobre a relação entre o tempo percorrido e a distância percorrida pela equipotencial, sendo que os efeitos de dispersão e difusão afetarão a parte inicial desse gráfico. Portanto, a parte inicial desta curva não é de interesse para este experimento. Com a continuidade das observações, a inclinação da curva se torna cada vez menor até chegar a zero, pois, com o decorrer do tempo, a pluma de sal irá se alongar e diluir ao ponto de não se comportar mais como uma equipotencial. Para o cálculo da velocidade, é escolhido o ponto onde a inclinação é máxima, ou seja, até onde a inclinação está aumentando e onde ela começa a diminuir.

A velocidade do fluxo das águas subterrâneas foi então calculada, para o eletrodo de corrente remoto B', conforme a seguir:

$$V(B') = \Delta R / \Delta t = 125 / 46 = 2,717 \, cm / h = 7,54 \, \mathrm{x} \, 10^{-6} \, m / s$$

Levando em consideração a posição dos outros dois eletrodos de corrente remotos, apenas duas ou três observações estão disponíveis. Assumindo um comportamento linear, a

Tempo decorr	ido Distância	superficial,	Incremento, $\Delta R$ (m)	Incremento	total,
(h:min)	R(m)			$\sum \Delta R(m)$	
Eletrodo de corre	nte				
remoto B'					
95:10	44,3				
115:00	44,9		0,6	$0,\!6$	
122:20	45,1		0,2	0,8	
140:00	$45,\!35$		0,25	1,05	
167:50	$46,\!15$		0,8	1,85	
192:35	$46,\!55$		$0,\!4$	2,25	
216:00	$46,\!95$		0,4	$2,\!65$	
239:45	47,2		$0,\!25$	2,9	
Eletrodo de corre	nte				
remoto B					
45:20	36,5				
68:15	$36,\!65$		$0,\!15$	$0,\!15$	
240:30	41,4		4,75	$5,\!00$	
Eletrodo de corre	nte				
remoto B"					
91:45	54,8				
240:00	60,06		5,26	5,26	

Tabela 2.4: Monitoramento das equipotenciais ao longo do perfil 2, no poço DS-2 utilizando o eletrodo de referência N1

Fonte: Adaptada de Pant (2004)

Tabela 2.5: Monitoramento das equipotenciais ao longo do perfil 2, no poço DS-2 utilizando o eletrodo de referência N2

Tempo	decorrido	Distância	superficial,	Incremento, $\Delta R$ (m)	Incremento	total,
(h:min)		R(m)			$\sum \Delta R \ (m)$	
Eletrodo de	e corrente					
remoto B'						
123:35		108,7				
141:15		109,1		0,4	$0,\!4$	
194:00		$110,\!05$		$0,\!55$	$0,\!95$	
217:15		110,4		0,4	$1,\!35$	
242:50		$110,\!65$		0,25	$1,\!6$	

Fonte: adaptada de Pant (2004)

velocidade do fluxo nessas posições foram dadas por:

 $V(B") = 526/148, 25 = 3,55\,cm/h = 9,8\,\mathrm{x}\,10^{-6}\,m/s$ 



Figura 2.66: Monitoramento das linhas de equipotencial no poço DS-2, para o eletrodo de referência N1 e o eletrodo de corrente remoto B' (Pant, 2004)



Figura 2.67: Monitoramento das linhas de equipotencial no poço DS-2, para o eletrodo de referência N2 e o eletrodo de corrente remoto B' (Pant, 2004)

$$V(B) = 500/1195, 16 = 2,56 \, cm/h = 7,11 \, \mathrm{x} \, 10^{-6} \, m/s$$

Levando em consideração estes cálculos, é possível notar a influência da posição do eletrodo de corrente remoto nas medidas das equipotenciais, uma vez que quando o eletrodo de corrente remoto foi posicionado em B", a velocidade encontrada divergiu da velocidade nas demais posições. A velocidade do fluxo das águas subterrâneas será considerada entre



Figura 2.68: Relação entre o tempo percorrido e a distância atravessada pela linha equipotencial no poço DS-2 para o eletrodo de referência N1 e o eletrodo de corrente remoto B' (Pant, 2004)

7,11 x  $10^{-6} m/s$  e 9,8 x  $10^{-6} m/s$ , ou pode-se considerar a sua média de 8,15 x  $10^{-6} m/s$  (70, 4 cm/dia).

## Poço CH-4

O esquema dos perfis de observação ao redor do poço CH-4 estão respresentados na figura 2.69, e a visão esquemática na figura 2.70. O processo inicial foi semelhante ao realizado no poço DS-2, com a injeção de cubos de sal e de solução salina na razão de de 0,75 litros por minuto. O espaço na vizinhança do poço permitiu o monitoramento do fluxo com o posicionamento de três eletrods de potencual de referência, N1, N2 e N3, com distâncias do poço, respectivamente de 10 m, 20 m e 30 m, na direção oposta esperada do fluxo.

Como este poço foi revestido por PVC, foi necessário a instalação de um eletrodo de corrente no interior do poço, em contato com a água salgada, e o outro eletrodo de corrente foi instalado em uma distância remota, como de praxe.

A injeção inicial dos cubos de sais e o começo da injeção de água salgada, neste poço,



Figura 2.69: Esquema dos perfis no poço CH-4 (Pant, 2004)



Figura 2.70: Visão esquemática do experimento no poço CH-4 (Pant, 2004)

começou em 23 de fevereiro de 2000, às 11:15, e findou no dia 29 de fevereiro de 2000, às 08:30. As tabelas 2.6, 2.7 e 2.8 representam os resultados do monitoramento das equipotenciais para o eletrodo de referência N1, N2 e N3, respectivamente, e as posições medidas das linhas de equipotenciais foram plotadas segundo a figura 2.71. Como este poço estava localizado próximo ao rio, não foi possível monitorar as partes dos perfis nos arredores do rio, contudo as medidas realizadas com o eletrodo de referência N1 indicam que a maior movimentação está concentrada ao longo do perfil 1.

Tempo	decorrido	Distância	superficial,	Incremento, $\Delta R~(m)$	Incremento	total,
(h:min)		R(m)			$\sum \Delta R (m)$	
1:30		$28,\!6$				
22:25		$28,\!95$		0,35	0,35	
48:40		$29,\!15$		0,2	0,55	
92:30		29,4		0,25	0,8	
117:40		$29,\!45$		0,05	0,85	
140:20		29,68		0,23	1,08	

Tabela 2.6: Monitoramento das equipotenciais ao longo do perfil 1, no poço CH-4 utilizando o eletrodo de referência N1

Fonte: Adaptada de Pant (2004)

Tabela 2.7: Monitoramento das equipotenciais ao longo do perfil 1, no poço CH-4 utilizando o eletrodo de referência N2

Tempo	decorrido	Distância	superficial,	Incremento, $\Delta R$ (m)	Incremento	total,
(h:min)		R(m)			$\sum \Delta R \ (m)$	
2:20		38,5				
22:35		38,3		0,25	0,25	
49:30		38,7		0,4	$0,\!65$	
73:35		38,77		0,07	0,72	
93:55		39,07		0,3	1,02	
118:00		$39,\!29$		0,22	$1,\!24$	
141:40		$39,\!66$		0,37	1,61	

Fonte: Adaptada de Pant (2004)

Tabela 2.8: Monitoramento das equipotenciais ao longo do perfil 1, no poço CH-4 utilizando o eletrodo de referência N3

Tempo	decorrido	Distância	superficial,	Incremento, $\Delta R$ (m)	Incremento	total,
(h:min)		R(m)			$\sum \Delta R \ (m)$	
49:45		46,85				
73:00		$47,\!25$		0,4	0,4	
92:45		$47,\!52$		0,27	$0,\!67$	
116:50		47,64		0,12	0,79	
140:30		47,94		0,3	1,09	

Fonte: Adaptada de Pant (2004)

A velocidade do fluxo do lençol freático foi calculada, conforme a figura 2.72 e os cálculos abaixo:

• Para o eletrodo de potencial de referência na posição N1:

$$V = \Delta R / \Delta t = 54, 4/47, 2 = 1, 152 cm / h = 28 cm / dia = 3, 2 \times 10^{-6} m / s$$



Figura 2.71: Monitoramento das linhas de equipotencial no poço CH-4, para os eletrodos de referência N1, N2 e N3 (Pant, 2004)

• Para o eletrodo de potencial de referência na posição N2:

$$V = \Delta R / \Delta t = 161, 8 / 139 = 1, 164 cm / h = 28 cm / dia = 3, 23 \times 10^{-6} m / s$$

• Para o eletrodo de potencial de referência na posição N3:

$$V = \Delta R / \Delta t = 113, 2/85 = 1,331 cm / h = 32 cm / dia = 3,69 \times 10^{-6} m / s$$

Conforme observado na figura 2.72, os valores iniciais não foram considerados nos calculos para o N3, desta forma os efeitos de dispersão e difusão foram considerados nos cálculos para N1 e N2, o que pode ser uma explicação para os valores para estas referências terem apresentado velocidade final menor que para o calculado em N3. A velocidade média final calculada foi de 29, 33 cm/dia.

# Conclusões

O trabalho desenvolvido por Pant (2004) tinha como objetivo principal estudar a velocidade e direção do fluxo de águas subterrâneas, através do aumento do contraste de condutividade elétrica ao inserir uma solução salina condutiva em um meio de baixa condutividade. Desta forma, a solução salgada percorreria o fluxo com a velocidade do lençol freático no qual foi inserido e o fluxo e a velocidade poderiam ser medidos através do campo elétrico.

O resultado deste experimento mostrou uma pluma de sal lenta, cujo sinal na superfície dependia, fortemente, da distância entre a pluma e o ponto de medida, pois a uma curta



Figura 2.72: Relação entre o tempo percorrido e a distância atravessada pela linha equipotencial no poço CH-4 para os eletrodo de referência (a)N1, (b)N2 e (c)N3 (Pant, 2004)

distância, se a pluma se tornasse muito comprida poderia deixar de se comportar como um corpo equipotencial, como representado no resultado alcançado no poço CH-4, para N1, no final das medições. Porém, no mesmo período, para N2 e N3, a pluma continuava a se comportar como um corpo equipotencial.

Mesmo sendo alocado em uma distância tendendo ao infinito, a posição do eletrodo de

corrente remoto também afeta as medidas, conforme observado nos resultados obtidos no poço DS-2.

No geral, o método se mostrou bastante prático no cálculo da velocidade do fluxo de água subterrânea, bem como uma forma mais econômica e menos invasiva de se realizar o estudo desta questão.

# DISCUSSÃO

O estudo apresentado por Pant (2004) utiliza do artifício de uma solução salina comportandose como corpo condutivo para realizar o estudo do fluxo das águas subterrâneas. Para tanto, foi interessante observar a técnica utilizada com o estudo sendo realizado em dois poços distintos e permitindo, além de verificar a direção do fluxo de água, calcular também a velocidade do fluxo entre esses dois poços.

# 2.8 Modelagem e inversão 3D do método mise-à-la-masse em um poço revestido de aço

Hatanaka et al. (2005) desenvolveram um artigo explicando uma técnica geoelétrica desenvolvida pelos mesmos para o imageamento de possíveis fraturas, a Tomografia do Fluxo de Fluidos (TFF). Neste método, a distribuição e extensão de fraturas podem ser avaliadas através de inversões 3-D de dados do mise-à-la-masse, usando um tubo de aço como eletrodo de corrente.

No trabalho em questão, foi desenvolvido um programa de inversão 3-D para os dados obtidos através do método mise-à-la-masse, utilizando um tubo como a fonte de corrente, para um sistema geoelétrico 4-D, com o objetivo de monitorizar o comportamento do fluxo de fluídos durante operações de injeção e produção.

O arranjo utilizado para este experimento conectou um eletrodo de corrente carregado com o invólucro condutor do poço, ao tempo em que o outro eletrodo de corrente foi aterrado a uma distância equivalente a 3 - 5 km do poço. O eletrodo de potencial de base foi aterrado a uma distância de 3 km do poço carregado, no lado oposto ao eletrodo de corrente aterrado, enquanto o outro eletrodo de potencial era movido ao longo de uma transversal para as medidas através do método mise-á-la-masse. Enquanto isso, múltiplos eletrodos de potencial foram utilizados para a medição do sistema geoelétrico 4-D.

Para a realização da inversão 3-D dos dados processados obtidos do levantamento miseà-la-masse, foi utilizado o método dos mínimos quadrados, através da Equação de Marquardt descrita abaixo:

$$(A^T A + \lambda C^T C)\Delta P = A^T \Delta g \tag{2.2}$$

onde A é a matriz jacobiana,  $\lambda$  é o fator de amortecimento, C é o fator de suavização,  $\Delta P$  é o vetor de ajuste de parâmetro e  $\Delta g$  é vetor residual.

O procedimento para a realização da inversão dos dados geofísicos seguiram a sequência abaixo:

## 1. Modelagem direta;

- 2. Cálculo da Matriz Jacobiana;
- 3. Método dos mínimos quadrados;
- 4. Cálculos numéricos iterativos; e,
- 5. Avaliação estatística dos resultados.

Com relação à matriz Jacobiana, foi utilizada ma matriz definida com cada elemento  $A_{ij}$  estabelecido como

$$A_{ij} = \frac{\partial \log \rho_{aj}}{\partial \log p_i} = \frac{p_i}{\rho_{ai}} \cdot \frac{\partial \rho_{aj}}{\partial p_{ij}} = \frac{p_i}{\rho_{ij}} \cdot G \cdot \frac{\partial V}{\partial \rho} \cdot \frac{1}{I}$$
(2.3)

onde  $p_i \in \rho_{aj}$  são, respectivamente, o parâmetro e a resistividade aparente de cada bloco, G é o fator geométrico, V é o potencial elétrico e I é a intensidade da corrente elétrica.

Considerando um espalhamento simples num meio homogêneo, tem-se:

$$\frac{\partial V}{\partial \rho} \cong \rho^{-2} \int_{v} \nabla V \cdot \nabla V' d\tau \tag{2.4}$$

onde V é o potencial elétrico, V' é o potencial elétrico decorrente de um eletrodo de corrente fictício no eletrodo de potencial P, e v representa o elemento volumétrico devido a mudança de resistividade elétrica.

Considerando a questão da dispersão do campo, a equação 2.4 pode ser escrita conforme abaixo:

$$\frac{\partial V}{\partial \rho} = \frac{I_c}{8\pi} \int_v \left( \frac{r_c \cdot r_p}{|r_c|^3 |r_p|^3} + \frac{r_c^* \cdot r_p}{|r_c^*|^3 |r_p|^3} \right) d\tau$$
(2.5)

onde  $c \in p$  representam, respectivamente, o eletrodo de corrente e o eletrodo de potencial, r é a distância vetorial do elemento volumétrico para cada eletrodo e \* representa a imagem espelhada do eletrodo de corrente.

Para o cálculo com o intuito de encontrar uma equação para uma fonte de linha de corrente, podemos integrar a equação da fonte de corrente pontual, considerando o ponto  $C,\ C(x_c,y_c,z_c),$ movendo entre os pontos C1 <br/>eC2,usando o parâmetro  $t(-1\leq t\leq 1)$ e definido como

$$\begin{cases} x_c = \left\{ (x_{C2} - x_{C1})t + x_{C2} + x_{C1} \right\} / 2 \\ y_c = \left\{ (y_{C2} - y_{C1})t + y_{C2} + y_{C1} \right\} / 2 \\ z_c = \left\{ (z_{C2} - z_{C1})t + z_{C2} + z_{C1} \right\} / 2 \end{cases}$$
(2.6)

Considerando um elemento pequeno dt e a densidade de corrente constante para a fonte de linha, temos:

$$dI = \frac{I}{l} \cdot d|r_c| = \frac{I}{l} \cdot \sqrt{dx_c^2 + dy_c^2 + dz_c^2} = \frac{1}{2}dt$$
(2.7)

Desta forma, para encontrar o campo de espalhamento para uma fonte de linha, pode-se substiuir dI em  $I_c$  na equação 2.5, e integrar de -1 até 1 em t, conforme abaixo:

$$\frac{\partial V}{\partial \rho} = \frac{1}{16\pi^2} \int_{-1}^{1} \int_{v} \left( \frac{r_c \cdot r_p}{|r_c|^3 |r_p|^3} + \frac{r_c^* \cdot r_p}{|r_c^*|^3 |r_p|^3} \right) d\tau dt$$
(2.8)

Por fim, o potencial é definido por:

$$\frac{\partial V}{\partial \rho} = \frac{1}{16\pi^2} \int_{-1}^{1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} F(x, y, z, t) dx dy dz dt$$
(2.9)

### A pesquisa mise-à-la-masse realizada na região geotermal de Sumikawa

O campo geotermal de Sumikawa está localizado na área vulcânica de Hachimantai, na região nordeste do Japão, onde existem vulcões ativos, fontes termais, fumarolas e três usinas de energia geotermais. Desta forma, a aquisição mise-à-la-masse foi realizada conjuntamente com a inspeção periódica da usina geotérmica da região de interesse.

Neste levantamento, o revestimento do poço S-3 foi utilizado como eletrodo de corrente e os potenciais foram medidos na superfície em eletrodos de potencial fixados ao redor do poço, conforme a figura 2.73. Nesta figura, é possível verificar o poço representado pelo círculo amarelo central, rodeado dos eletrodos de medida de potencial, representados pelos círculos brancos. Ainda é possível verificar a posição do eletrodo de corrente de referência, marcado pelo círculo vermelho, e do eletrodo de potencial de referência, representado pelo círculo azul.

O eletrodo de corrente foi conectado ao invólucro do poço, que possui um comprimento de 800 m e 101 eletrodos de potencial foram distribuídos radialmente ao poço, com intervalos de 100 m, conforme a figura 2.73. As medidas foram, então, realizadas durante o período de quatro semanas, durante o processo de inspeção da usina geotermal, entre os dias 14/09/2000 e 07/10/2000.



Figura 2.73: Arranjo dos eletrodos para a pesquisa mise-à-la-masse na região geotermal de Sumikawa, Japão (Hatanaka et al., 2005)

A figura 2.74 representa a distribuição de resistividade aparente observada na data de 01/10/2000.



Figura 2.74: Distribuição de resistividade aparente do levantamento realizado em Sumikawa, Japão (Hatanaka, Aono, Mizunaga e Ushijima, 2005)

A distribuição de resistividade obtida não foi homogênea, confirmando a variação lateral e vertical da resistividade em função da distância do poço. Desta forma, para remover a variação de resistividade vertical, foi realizada uma inversão baseada num modelo de camadas. O resultado obtido nesta inversão mostrou uma primeira camada com resistividade de  $2,5 \Omega m$  e espessura de 800 m e a segunda camada com resistividade de  $620 \Omega m$ . Usando este modelo de duas camadas, foram, então, calculados os valores residuais de resistividade aparente, cuja distribuição esta representada na figura 2.75.



Figura 2.75: Distribuição de resistividade aparente residual do levantamento realizado em Sumikawa, Japão (Hatanaka et al., 2005)

A região leste desta área se destaca por apresentar zonas de baixa resistividade, delineando a existência de falhas com mergulho na direção Norte-Sul, nesta região. Para completar o estudo do espaço de interesse, foi realizada a inversão 3D, utilizando um modelo de bloco 3D baseado no método dos mínimos quadrados. Os mapas de contorno cortados em determinadas profundidades foram ilustrados na figura 2.76. Em profundidades menores que 600 mforam observadas regiões de baixa resistividade, com valores menores que  $10 \Omega m$ , enquanto que em pronfundidade abaixo de 600 m, zonas de alta resistividades apareceram. A conclusão final é que existem reservatórios geotermais abaixo da zona de baixa resistividade ao nordeste do poço S-3.

# Conclusões

O método TFF foi utilizado para localizar possíveis fraturas na região de Sumikawa, uma vez que o estudo do comportamento dos fluidos na subsuperfície podem ser monitorados e visualizados pela tecnica descrita, levando a diversas possibilidades, como por exemplo:



Figura 2.76: Distribuição de resistividade fatiada em relação à profundidade da inversão 3D (Hatanaka et al., 2005)

- A obtenção de medidas de potencial espontâneo e da resistividade aparente;
- A visualização dos limites do fluxo de fluídos através do potencial residual, após a subtração entre os dados antes da injeção e os dados após a injeção;
- A permeabilidade da formação pode ser avaliada através da resistividade aparente e da Lei de Archie;
- as distribuições 3-D das fraturas poderiam ser modeladas através da união desta técnica com outros métodos geofísicos, como o magnetotelúrico e as sondagens elétricas verticais.

# DISCUSSÃO

O trabalho apresentado por Hatanaka et al. (2005) é intrigante, pois mostra a possibilidade de criação de um novo método tendo como base o mise-à-la-masse, uma vez que os autores apresentaram o método da Tomografia de Fluxo de Fluidos, para o monitoramento do fluxo de fluidos e o imageamento de fraturas.

Como o mise-à-la-masse mostra-se como um método com diversas aplicabilidades, este artigo apresenta mais uma possibilidade ao permitir a delineação de fraturas através da inversão de dados obtidos de um levantamento mise-à-la-masse.

Uma curiosidade do método aplicado é o fato de todo o invólucro do poço atuar como eletrodo de corrente. A ligação entre os métodos geofísicos aparece novamente, ao também serem utilizados o método do potencial espontâneo e a eletrorresistividade.

# 2.9 Caracterização de um aterro sanitário

De Carlo et al. (2013) apresentaram um trabalho utilizando os métodos mise-à-la-masse e a tomografia de resistividade elétrica, na região de um aterro sanitário abandonado, com o objetivo de caracterizar e monitorizar a área com relação a presença de contaminantes.

Os métodos geofísicos, particularmente os métodos elétricos, são bastante utilizados na análise dos impactos causados por aterros sanitários ao ambiente, pela possível contaminação do subsolo e de águas subterrâneas pelo chorume. Os métodos elétricos mostram-se eficientes, uma vez que o chorume é rico em matéria orgânica, formando uma solução salina condutiva. O fato das técnicas utilizadas nos levantamentos geofísicos serem minimamente invasivas é outro fator importante nos estudos de aterros sanitários, pois estas estruturas são elaboradas com o intuito de conter os resíduos e o chorume, e os métodos mais diretos, como a perfuração e amostragem, podem comprometer a estrutura do aterro, fornecendo novos caminhos para a migração do contaminante.

A área de interesse deste artigo trata-se de uma pedreira abandonada, na região sul da Itália, localizada a 2 km na direção noroeste do município de Corigliano d'Otranto, e a 20 km do Mar Adriático, conforme a figura 2.77. Contudo, os resíduos da cidade foram autorizados a serem descartados nesta região, após a pedreira ser forrada por um polietileno de alta densidade, formando uma camada de aproximandamente 20 m de espessura de lixo.

Conforme verificado na figura 2.77, um novo aterro estava em processo de construção durante o período do levantamento realizado. Com as escavações para a realização deste novo aterro, foi encontrado chorume na base do talude pertinente, de forma que se mostrou essencial um estudo referente a contaminação da área, ainda mais por ser uma região com poços de água para consumo humano e para irrigação locados nos arredores destes aterros.



Figura 2.77: Região do aterro na cidade de Corigliano d'Otranto, com a posição do poço P4 (De Carlo et al., 2013)

O objetivo dos levantamentos geofísicos realizados foram, então, analisar a existência, extensão, integridade e efetividade do forro de polietileno de alta densidade, sendo os métodos geofísicos preferidos em relação aos métodos diretos de investigação, pois estes últimos poderiam gerar danos na estrutura do aterro que facilitaria a migração do contaminante. Assim, Linhas 2D de Tomografia de resistividade elétrica e uma pesquisa mise-à-la-masse foram realizadas entre maio e junho de 2010, utilizando a configuração representada na figura 2.78, onde as linhas tracejadas vermelhas representam os perfis de tomografia e os pontos laranjas, os locais onde foram instalados os eletrodos de potencial para a pesquisa utilizando o mise-á-la-masse. A pesquisa mise-à-la-masse também realizou aquisições nas linhas 2 e 3, com os eletrodos de corrente fixados nos pontos A e B, e o eletrodo de potencial de referencial localizado no ponto P.

Com relação aos perfis de Tomografia de Eletrorresistividade, duas linhas de aquisição foram traçadas cortando o complexo, as linhas 1 e 2, com o objetivo de avaliar a espessura da camada de resíduos. Contudo, apenas a Linha 2 atravessa ambos os aterros, o antigo e o novo, enquanto que a Linha 1 percorre um caminho horizontal referente a uma estrada de terra que separa ambos os aterros. Por sua vez, a Linha 3 está localizada fora da região do aterro, para registrar informações de camadas geológicas que não foram perturbadas pelo depósito de resíduos. Os levantamentos em todas as três linhas utilizaram um arranjo de 235 m de comprimento, com 48 eletrodos espaçados entre si em 5 m.

A aquisição mise-à-la-masse, por sua vez, teve como principal objetivo checar a exis-



Figura 2.78: Localização das linhas onde foram realizadas as medidas na região de Corigliano (De Carlo et al., 2013)

tência e integridade do forro de polietileno, identificando possíveis caminhos entre as partes internas e externas do aterro. Desta forma, um eletrodo de corrente foi fixado dentro do aterro, A, enquanto, o outro eletrodo, B, foi localizado fora do aterro. Os alinhamentos das Linhas 1 e 2 foram mantidos nesta aquisição, porém sete outras foram acrescentadas na área do aterro antigo, com um espaçamento de 2m.

Os resultados alcançados com a tomografia de resistividade elétrica mostram claramente uma evidência do efeito que o material descartado no aterro apresenta sobre a resistividade elétrica na subsuperfície. A figura 2.79 representa o resultado alcançado pelas aquisições na Linha 3, que não corta o aterro, e, portanto, apresentou uma distribuição regular da resistividade elétrica. Por sua vez, as Linhas 1 e 2, respresentadas pelas figuras 2.80 e 2.81, respectivamente, apresentam uma heterogeneidade, com a presença de um corpo condutivo, provavelmente representando os resíduos deste aterro. Contudo, este corpo condutivo aparenta estar mais raso na Linha 1 do que na Linha 2, o que aparenta ser uma contradição devido à inclinação presente na região. Esta contradição ocorre porque a aquisição realizada na Linha 1 acaba violando a suposição tomada em tomografias 2D de resistividade elétrica, de que as distribuições de resistividades são equivalentes para todos os planos verticais paralelos plano vertical que passa pela linha de aquisição.

A linha 2 apresenta o corpo condutivo com sua base em uma profundidade de aproximadamente 40 m, abaixo dos 20 m esperados do fundo do aterro antigo. Desta forma, é possível avaliar que o corpo de resíduos é mais espesso do que o imaginado ou que ocorreu uma migração vertical do chorume condutivo.



Figura 2.79: Tomografia de resistividade elétrica ao longo da Linha 3 (De Carlo et al., 2013)



Figura 2.80: Tomografia de resistividade elétrica ao longo da Linha 1 (De Carlo et al., 2013)

O levantamento mise-à-la-masse resultou em uma resposta contraditória a esperada diante dos perfis de tomografia eletrorresistiva, pois o mapa resultante, figura 2.82, apresentou uma variação brusca nos limites do aterro antigo, principalmente no sentido Sudoeste, onde se encontra a única parte visível do forro de polietileno. Desta forma, diante desta baixa evidência da presença do forro em profundidades rasas, não é surpresa a corrente elétrica conseguir contornar esta barreira, como está visível ao Norte do aterro antigo. Conseguentemente, a figura 2.82 não é suficiente para confirmar ou não a eficiência do forro em limitar a migração do contaminante.

Um modelo tridimensional da região do aterro de Corigliano foi criado, utilizando os dados obtidos do levantamento da tomografia de resistividade elétrica das figuras 2.80 e 2.81, com o objetivo de compreender todos os dados coletados em um quadro quantitativo, que ajudasse na discriminação entre cenários alternativos na interpretação. O modelo criado está



Figura 2.81: Tomografia de resistividade elétrica ao longo da Linha 2. HDPE Level representa o nível do forro de polietileno (De Carlo et al., 2013)



Figura 2.82: Mapa do mise-à-la-masse no aterro antigo (De Carlo et al., 2013)

representado na figura 2.83 e destaca quatro regiões: o corpo de resíduos, uma região de alta resistividade representando a linha do polietileno de alta densidade (PEAD), a camada de solo e a região que não sofreu nenhum distúrbio pelas aquisições realizadas (*background*). A partir deste modelo, diversas soluções foram calculadas considerando diversos cenários e, particularmente, condições para o forro de polietileno.

Os modelos 3D calculados podem então ser utilizados para produzir dados sintéticos para aquisições sintéticas de tomografia de eltrorresistividade e do mise-à-la-masse, e assim, comparar esses modelos calculados com os obtidos nas aquisições de campo.



Figura 2.83: Seção do modelo 3D de referência do aterro de Corigliano d'Otranto (De Carlo et al., 2013)

### Forro intacto de polietileno de alta densidade

Esse método de comparação entre os dados obtidos em laboratório com os dados obtidos em campo, consderaram dois cenários distintos: o primeiro sendo com o forro de polietileno sem nenhuma variação e o segundo considerando o forro apresentando danos.

Considerando o forro de polietileno intacto, a tomografia de eletrorresistividade com dados sintéticos resultou no modelo da figura 2.84 e no perfil da figura 2.85.



Figura 2.84: Modelo 3D para o cenário onde o forro de polietileno está intacto (De Carlo et al., 2013)

Os resultados obtidos neste cenário mostram a região de baixa resistividade, referente ao corpo de resíduos, com uma espessura de 20 m. Sendo esse um resultado coerente com o encontrado na profundidade real obtida na inversão da Tomografia realizada em campo. Contudo a comparação entre os resultados obtidos nas figuras 2.80 e 2.81 e na figura 2.85, mostram que a ideia de um forro intacto pode ser descartada.

No mise-à-la-masse, os resultados calculados levaram ao mapa respresentado na figura 2.86, que apresenta certa similaridade com o mapa da figura 2.82, não sendo idênticos pela



Figura 2.85: Tomografia de resistividade elétrica simulada para o cenário considerando o forro de polietileno intacto (De Carlo et al., 2013)

dificuldade em reproduzir a distribuição de resistividade do campo no modelo considerado. Desta forma, os resultados do mise-à-la-masse não entram em contradição, como ocorreu com a tomografia.



Figura 2.86: Mapa simulado do mise-à-la-masse para o cenário considerando o forro de polietileno intacto (De Carlo et al., 2013)

## Forro avariado de polietileno de alta densidade

Diversos cenários foram examinados para a situação do forro com avarias, a fim de entender o nível dos danos presentes neste forro. Em particular, foi considerada a situação representada pela figura 2.87, resultando no perfil de tomografia de resistividade elétrica da figura 2.88. A comparação entre as figuras 2.88 e 2.81 confirma a hipótese da presença de danos no forro

e da migração do chorume.



Figura 2.87: Modelo 3D para o cenário onde o forro de polietileno está avariado (De Carlo et al., 2013)



Figura 2.88: Tomografia de resistividade elétrica simulada para o cenário considerando o forro de polietileno avariado (De Carlo et al., 2013)

O mapa simulado do mise-à-la-masse para esta situação é representado pela figura 2.89, que não apresenta diferenças significativas dos mapas das figuras 2.82 e 2.86.

O último caso considerado foi a situação na qual a acumulação de chorume seria resultado da falta de instalações para a captação de água da chuva e a drenagem do chorume. O modelo e os resultados da tomografia para esta situação são representados pelas figuras 2.90 e 2.91. Estes resultados estão ainda mais próximos dos resultados obtidos nas aquisições realizadas em campo. Com relação ao mise-à-la-masse, o mapa resultante, da figura 2.92, não apresenta variações discrepantes dos outros mapas anteriormente obtidos.

# Conclusões

Devido as preocupações com a integridade da estrutura do aterro sanitário, os métodos diretos de investigação são muito arriscados, tornando os métodos geofísicos, particularmente os elétricos, extremamente úteis para este tipo de situação. Os resultados obtidos neste artigo corroboram com esta consideração.



Figura 2.89: Mapa simulado do mise-à-la-masse para o cenário considerando o forro de polietileno avariado (De Carlo et al., 2013)



Figura 2.90: Modelo 3D para o cenário onde o forro de polietileno está avariado e a não existância de instalações para a drenagem do chorume (De Carlo et al., 2013)



Figura 2.91: Tomografia de resistividade elétrica simulada para o cenário considerando o forro de polietileno avariado e a não existância de instalações para a drenagem do chorume (De Carlo et al., 2013)



Figura 2.92: Mapa simulado do mise-à-la-masse para o cenário considerando o forro de polietileno avariado e a não existância de instalações para a drenagem do chorume (De Carlo et al., 2013)

Os resultados da tomografia de resistividade elétrica apresentaram um corpo condutivo irregular, referente aos resíduos deste aterro, alcançando uma profundidade de 40 m e uma espessura de 20 m, o que demonstra uma migração do chorume atravessando o forro que deveria ser impermeável.

Com relação ao mise-à-la-masse, as medidas indicaram um forro relativamente contínuo, mesmo com certa passagem de corrente para a área externa à região confinada pelo forro.

Devido as limitações encontradas na logística para as aquisições realizadas em campo, foram realizadas também medidas sintéticas através de modelagem 3D. Os resultados encontrados através desta modelagem comprovaram os resultados das tomografias e da presença de danos do forro de polietileno, com a migração do chorume para o subsolo. Contudo, mostrou que o método mise-à-la-masse não conseguiria localizar os danos no forro, com as configurações utilizadas.

# DISCUSSÃO

Levantamentos de resistividade elétrica e do mise-à-la-masse foram realizados em De Carlo et al. (2013), com o intuito de verificar a eficácia do forro de polietileno de um aterro sanitário. Este estudo é possível devido a condutividade elétrica apresentada pelo chorume.

Apesar da extrema importância deste tema, foi verificado que o mise-à-la-masse não conseguiria localizar as regiões onde o forro apresenta danos. Para conseguir localizar os vazamentos, seria necessário alterar os padrões utilizados.

Contudo, mesmo com um resultado não tão positivo, este artigo consegue exemplificar

a utilização do método para a questão da caracterização de aterros sanitários.

# 2.10 Detecção do vazamento em reservatórios de água

A metodologia utilizada por Ling et al. (2019) recorreu ao método mise-à-la-masse, com o intuito de detectar vazamentos no fundo de reservatórios de água de forma minimamente invasiva, uma vez que estes vazamentos são responsáveis pela perda de água e o espalhamento de contaminantes.

Os reservatórios de água utilizados na agricultura e na indústria, podem ocasionar sérios problemas na infraestrutura onde estão localizados se apresentarem vazamentos. Da forma semelhante, as indústrias químicas e de mineração utilizam geomembranas sintéticas, que se aparecerem vazamentos podem acarretar em contaminações do solo e de águas subterrâneas. Consequentemente, é vital a identificação de vazamentos o quanto antes.

Os métodos elétricos mostram-se bastante eficientes e minimamente invasivos na detecção dos vazamentos nestes reservatórios, principalmente os métodos eletrícos como a tomografia de resistividade elétrica, o potencial espontâneo e o mise-à-la-masse. O método mise-à-la-masse se mostra uma ferramenta poderosa na detecção deste tipo de vazamento, principalmente na presença de uma geomembrana isolante.

A utilização ideal do método mise-à-la-masse, nesse caso, seria a injeção de corrente elétrica no corpo de água condutivo, uma vez que a corrente iria preferir fluir através dos locais onde o reservatório apresenta um vazamento. Para tanto, um eletrodo de corrente (A) seria injetado dentro do reservatório, em contato com a água, ao tempo em que o outro eletrodo de corrente (B) seria posicionado a uma grande distância do reservatório. Um eletrodo de potencial (N) seria alocado numa certa distância do reservatório, como um ponto de referância, e as medidas seriam realizadas a partir de outro eletrodo de potencial (M), que percorreria um trajeto definido.

No estudo realizado neste artigo, 29 experimentos foram realizados em caixas de areia, com o objetivo de detectar os vazamentos no fundo de reservatórios de água com geomembranas isolantes e impermeavéis. A figura 2.93 representa um esboço da caixa de acrílico utilizada nos experimentos com dimensões de  $53,7 cm \ge 28,5 cm \ge 33,4 cm$ .

Nestes experimentos realizados, a caixa foi preenchida com areia sílica, até uma espessura de  $25 \, cm$ . Esta areia foi, então, saturada com água, apresentando uma resistividade elétrica de  $50 \, \Omega m$ . Um recipiente de plástico foi utilizado para simular o reservatório de água, com as dimensões de 22, 5 cm de comprimento, 15, 0 cm de largura e 4, 7 cm de altura, e posicionado no centro da caixa. Em seguida, este recipiente foi preenchido com a mesma água utilizada para saturar a areia sílica, até o nível da superfície da areia, e diversas



Figura 2.93: Esboço da caixa de areia com o recipiente de plástico utilizado para simular o reservatório. (a) Geometria. (b) Visão superior. (c) Seção vertical cortando os eletrodos A e B (Ling et al., 2019)

aberturas foram perfuradas no fundo deste recipiente para representar os vazamentos, com diamêtros de  $0, 4 \, cm, 0, 6 \, cm \in 0, 8 \, cm$ .

Para a realização de medidas de mise-à-la-masse, 59 eletrodos foram posicionados ao redor do reservatório, na superficíe. O eletrodo de corrente positiva (A) foi colocado no topo central do reservatório preenchido por água, enquanto o eletrodo de corrente negativa (B), foi posicionado na superfície da caixa de areia na posição central do lado esquerdo, conforme a figura 2.93. O eletrodo de referência de potencial (N) foi alocado no canto inferior direito da superfície da caixa, e as medidas foram realizadas com os outros 56 eletrodos restantes. Todos estes 56 eletrodos foram posicionados ao redor do reservatório a uma distância de 1 cm da sua borda.

Após as medidas de aquisição serem coletadas, modelagem direta e inversa foram empregadas no cálculo da localização dos vazamentos.
#### Resultados dos experimentos realizados em laboratório

Para a detecção de vazamento de reservatórios, o eletrodo de corrente positiva A geralmente é alocado dentro do reservatório, ao tempo em que o eletrodo de corrente negativa B será posicionado fora do reservatório, de forma a forçar o fluxo de corrente a passar pelos locais onde estão presentes os danos na geomembrana. Desta forma, experimentos foram realizados gerando os mapas apresentados na figura 2.94, com os eletrodos de potenciais dentro do reservatório para a realização das medidas. Estes resultados confirmam que o valor mínimo da diferença de potencial está próximo da localização do vazamento, provando ser um método eficiente quando os eletrodos podem ser posicionados no interior do reservatório.



Figura 2.94: Mapas de contorno dos experimentos sintéticos para diferentes posições do vazamento (Ling et al., 2019)

Apesar da instalação dos eletrodos de potencial no interior do reservatório fornecer ótimos resultados, nem sempre o fundo do reservatório é acessível, de forma que é necessário organizar os eletrodos ao redor do tanque, sendo esta a situação alvo do estudo deste artigo. Para esta configuração, os resultados alcançados foram retratados na figura 2.95, onde é possível avaliar a posição dos pontos de máximo potencial elétrico em relação a posição do vazamento. O estudo destes resultados demonstram a dificuldade de apontar a posição do vazamento quando este está abaixo da linha central onde estão os eletrodos de corrente A e B, ao tempo em que o máximo de voltagem cresce a medida que a distância entre o vazamento e o eletrodo de potencial N. Outra consideração importante é o fato de o diamêtro do furo não ter muita importância no resultado final, pois as curvas para os três diamêtros estudados apresentaram respostas semelhantes.



Figura 2.95: Variação no Potencial elétrico medido no experimento para um único vazamento (Ling et al., 2019)

Considerando ainda a configuração com os eletrodos de potencial em volta do reservatório, foi também analisada a situação de um vazamento através de uma ruptura. Assim, foram analisados dois casos: para três furos juntos de  $0, 4 \, cm$  de diâmetro cada e para cinco furos de  $0, 4 \, cm$  em sequência. Os resultados observados, representados na figura 2.96, não mostraram uma diferença brusca entre a situação dos três furos (1, 2 cm de comprimento) e dos cinco furos (2, 0 cm de comprimento), apresentando ainda comportamento semelhantes para os casos observados nas situações de apenas um furo como vazamento, conforme a figura 2.95.



Figura 2.96: Variação no Potencial elétrico medido no experimento para três e cinco furos conectados (Ling et al., 2019)

A figura 2.97 representa o resultado das inversões para uma única fonte pontual de vazamento com diâmetro de  $0, 6 \, cm$ , uma vez que os resultados para os diâmetros de  $0, 4 \, cm$  e

0, 8 cm seriam semelhantes. O desvio médio entre a posição real do vazamento e os resultados encontrados nos experimentos foi de 0, 43 cm, sendo o desvio máximo de 1, 0 cm, sendo óbvia a precisão do método para a localização de um único vazamento pontual. Para a representação de uma fissura, a figura 2.98 mostra o resultado da situação de três furos conectados, onde o desvio médio entre a distância calculada e a distância real do vazamento foi de 0, 62 cm, desvio máximo foi de 0, 80 cm e o mínimo de 0, 28 cm.



Figura 2.97: Distribuição da densidade de corrente para um vazamento pontual em diferentes localizações (Ling et al., 2019)



Figura 2.98: Distribuição da densidade de corrente para três furos conectados em diferentes localizações (Ling et al., 2019)

#### Testes de Campo

Com o objetivo de testar ainda mais o método mise-à-la-masse, foram conduzidos testes no Campus da Univesidade Savoie Mont Blanc (Savoie, França), onde a superfície estava coberta com uma camada de silte, com sedimentos do tamanho de argila misturados com cascalhos. Um tanque cúbico de plástico, com dimensões  $82 \, cm$  de comprimento,  $35 \, cm$  de largura e 13,  $5 \, cm$  de altura, foi utilizado para simular o reservatório, conforme a figura 2.99. Dois furos de 0,  $4 \, cm$  de diâmetro foram utilizados para simular os vazamentos, sendo que apenas um foi utilizado nos experimentos, enquanto o outro era mantido selado. Um dos furos estava localizado ao centro, ao tempo em que o restante estava localizado na parte mais baixa à direita.

Previamente à aquisição mise-à-la-masse, quatro perfis de resistividade elétrica foram traçados, utilizando o arranjo Wenner, através das linhas 1-1' e 2-2', com 32 eletrodos e 3-3' e 4-4', com 24 eletrodos. Para todos os quatro perfis, o espaçamento entre os eletrodos foi de  $4 \, cm$ . Na aquisição das medidas para o mise-à-la-masse, 63 eletrodos foram utilizados, com o eletrodo de corrente A posicionado na parte inferior esquerda do interior do reservatório, o eletrodo de corrente B posicionado  $6 \, m$  de distância do tanque, o eletrodo de referência de potencial N localizado entre o tanque e o eletrodo B e os demais eletrodos de potencial instalados ao redor do tanque.

Os resultados dos perfis de resistividade elétrica estão reproduzidos na figura 2.100, apresentado distribuição semelhantes nos quatro perfis. É possível observar a diminuição da



Figura 2.99: Esboço dos testes de campo para detecção de vazamento (Ling et al., 2019)

resistividade do solo com relação à profundidade e a presença de uma camada resistiva numa profundidade menor que  $5 \, cm$ . As medidas encontradas aqui foram utilizadas no modelo para o processamento dos dados do mise-à-la-masse.

A diferença de potencial foi medida para ambos os vazamentos, sendo o vazamento 1 para o furo localizado no centro do reservatório e o vazamento 2, o furo disposto na parte inferior direita. Os resultados obtidos estão caracterizados na figura 2.101.

Posteriormente à realização da modelagem e inversão dos resultados, a distribuição da densidade de corrente foi apresentada de acordo com a figura 2.102. Os resultados apresentaram um desvio de 1*cm* entre a posição real e a medida dos vazamentos, comprovando a eficiência do método para a localização dos vazamentos em resevatórios.

#### Conclusões

A primeira questão a se pontuar é a relevante ligação entre o método mise-à-la-masse e resistividade elétrica, uma vez que é necessário ter conhecimento da resistividade elétrica da região para a adequada aplicação do método mise-à-la-masse na detecção de vazamentos de reservatórios.

Os experimentos realizados na caixa de areia mostraram o quanto o método é eficiente na localização da fonte pontual de vazamentos e apresenta os resultados para vazamentos de rupturas com pequenos desvios da posição real.

Para confirmação da eficiência do método, foram realizados experimentos de campo, que comprovaram a aplicabilidade do mise-à-la-masse para a detecção de vazamentos em



Figura 2.100: Perfis de resistividade elétrica para os testes de campo (Ling et al., 2019)



Figura 2.101: Variações na diferença de potencial elétrico medidas nos testes de campo (Ling et al., 2019)

reservatórios.

#### DISCUSSÃO

No estudo do método mise-à-la-masse, o artigo apresentado por Ling et al. (2019) tem sua importância, principalmente, por demonstrar o uso do método de forma experimental, em laboratório. Além de confirmar, posteriormente, através de testes de campo.

Os experimentos foram realizados devido à importância de manter a estrutura dos



Figura 2.102: Distribuição da densidade de corrente para a detectação do vazamento nos testes de campo (Ling et al., 2019)

reservatórios intacta, evitando assim o vazamento, e, diante de experimentos laboratóriais e levantamentos em campo, o mapeamento de vazamentos foi possível.

### 2.11 Monitoramento no tempo da absorção de água pelas raízes em um vinhedo

Métodos elétricos (eletrorresistividade e mise-à-la-masse) foram utilizados para monitorar as raízes de plantas e suas atividades, durante um experimento de infiltração, por Mary et al. (2020). Este experimento, realizado num vinhedo da região de Bordeaux (França), focou no comportamento de duas videiras vizinhas.

O estudo da interação entre a interface solo-planta-atmosfera sempre foi de fundamental importância para entrender a troca de massa e energia entre os ecosistemas terrestres e a atmosfera, de forma que, este artigo focou em um método para imagear sistema de raízes e seu funcionamento macroscópico, com o intuito de entender este complexo sistema.

As raízes funcionam como a conexão entre o solo, onde encontram-se água e nutrientes, e os órgãos e tecidos da planta, onde esses recursos são utilizados, de forma que as raízes apresentam um fluxo de água do solo e outras substâncias, sendo os maiores responsáveis pela saída de água do solo em sistemas vegetais. Contudo, a análise da configuração da raízes no espaço e sua evolução no tempo é praticamente impossível através de métodos diretos invasivos, desta forma técnicas minimamente invasivas são necessárias.

O método do potencial espontâneo pode ser utilizado neste contexto, uma vez que a circulação de água e a segregação mineral no sistema solo-raízes pode gerar gradientes de concentrações iônicas, porém essas fontes, normalmente, são baixas demais para serem detectadas no ambiente ruidoso. Consequentemente, o método mais utilizado é a tomografia de resistividade elétrica. A aplicabilidade do método mise-à-la-masse para esta situação é mais recente.

A região do estudo foi no vinhedo comercial de Château La Louvière, em Pessac-Léognan, Bordeaux, França. Área esta onde as videiras são plantadas com 1 m de distância entre elas, em linhas espaçadas em 1,5 m entre si. O solo desse vinhedo é arenoso até 1 mde profundidade, como presença de argila arenosa até 1,75 m, sendo calcário em profundidades maiores. Este solo não era constantemente irrigado e o estudo levou em consideração duas videiras vizinhas, uma menor e mais nova e outra maior e mais antiga. A figura 2.103 sintetiza a caracterização da área.



Figura 2.103: Fotos do campo de estudo (Mary et al., 2020)

Um estação meteorológica, presente a 300 m de distância da região de estudo, realizaava medições a cada hora. Essas medições foram fundamentais para estimar as condições iniciais do solo e as variações em função do tempo. Na data da primeira aquisição, 19 de junho de 2017, foi observada uma baixa taxa de precipitação, com um precipitação total cumulativa de 18 mm em todo o mês de junho de 2017. Neste período, a média da temperatuda do ar foi bastante alta o que, juntamente com a baixa taxa de precipitação, levou a um momento de deficiência de água nas plantas do vinhedo. Desta forma, para o experimento realizado, um irrigador foi instalado entre as duas videiras monitoradas, para uma irrigação que levou a duração de duas horas e trinta minutos.

Para as aquisições de eletrorresistividade, foram perfurados seis poços, e cada um recebeu 12 eletrodos. Além disso eletrodos foram fixados em superfície, conforme a figura 2.104, onde é possível notar que os poços realizados formam dois retângulos,  $1 m \ge 1, 2 m$  cada, com as duas videiras analisadas no centro de cada retângulo, sendo cada uma retrada por pontos verdes na imagem. Nos poços, o primeiro eletrodo foi posicionado a uma distância de 0, 1 mda superfície, e todos os eletrodos foram posicionados a uma distância vertical de 0, 1 m entre si. Com relação aos eletrodos de superfície, 24 foram instalados com uam distância de 20 cmentre si, em cada direação horizontal. As medidas forão, então, realizadas em cada retângulo de forma independente.



Figura 2.104: (a) Visão 3-D dos eletrodos de superfície(azul) e dos eletrodos em poços (preto) para a aquisição de eletrorresistividade; (b) Visão do topo dos eletrodos de superfície. Os pontos verdes mostram a posição das videiras (Mary et al., 2020)

Para as medidas do mise-à-la-masse, foi mantida a mesma estrutura e os eletrodos de superfície e dos poços foram utilizados como eletrodos de potencial, ao ponto em que um eletrodo de corrente foi inserido diretamente no caule das plantas. os eletrodos de referência de corrente e potencial foram alocados em direções opostas e uma distância de 30 m do sítio de estudo. Medidas do mise-à-la-masse com o eletrodo de corrente no solo, próximo ao caule, também foram realizadas, com o objetivo de evidenciar os efeitos do sistema caule-raíz.

#### Resultados

As aquisições foram realizadas em seis tempos diferentes:  $T_0$ , para as medições antes da realização da irrigação,  $T_1$ , durante o processo de irrigação, e  $T_2$  até  $T_5$ , medidas realizadas após a irrigação ter sido finalizada, sendo que as medidas de  $T_3$ ,  $T_4$  e  $T_5$  foram realizadas no

segundo dia do experimento.

A condutividade elétrica do solo antes do período de irrigação  $(T_0)$  foi de um valor médio de 100  $\Omega m$ , condizente com um solo arenoso seco. Para a menor planta, A, a mais alta resistividade se apresentou em um profundidade de 0, 5 m, enquanto que para a planta B, a maior, os valores de resistividade se mostraram mais difusos e menos resistivos se comparados com a planta A, conforme a figura 2.105. Os valores de  $T_0$  mostraram uma baixa resistividade entre 0 e 0, 35 m de profundidade para a videira A, e entre 0 e 0, 25 m de profundidade para B. Valores maiores de resistividade foram encontrados em profundidades intermediárias, que podem estar relacionadas com o decaimento da saturação do solo devido ao consumo de água pelas raízes, ou a presença de raízes mais robustas.



Figura 2.105: Resultados da Tomografia de Resistividade Elétrica no tempo  $T_0$  para a planta A(a) e B(b) (Mary et al., 2020)

As variações dos valores de eletrorresistividade, medidas durante o processo de irrigação, não podem ser diretamente comparadas entre as duas plantas, pois as medidas para a videira B foram realizadas 30 minutos após o início da irrigação, enquanto para a planta A, as medições só começaram a serem feitas após 2 horas do início da irrigação. A figura 2.106 apresenta os resultados durante e após a irrigação para a planta B, mostrando uma queda na resistividade na região superior a 40 cm, causada pela alta infiltração da camada porosa presente nesta área. Os resultados para a planta A foram semelhantes.

Após a irrigação, foi difícil verificar as mudanças de valores da resistividade, contudo, a inversão mostrou um crescimento na eletrorresistividade nas camadas mais superiores, entre os períodos  $T_0$  e  $T_3$ .



Figura 2.106: Resultados da Tomografia de Resistividade Elétrica no tempo  $T_1$  para a planta B. (a)Resultados para os tempos  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  e  $T_5$ . (b)Inversão de lapso do tempo para as razões  $T_i$  e  $T_0$  (Mary et al., 2020)

As medidas do mise-à-la-masse levaram aos resultados ilustrados na figura 2.107, para a planta B, no período anterior e durante a irrigação e com os eletrodos no caule e no solo. Para todos os casos, o padrão apresetando foi assimétrico, indicando o controle da heteregoneidade do solo nos caminhos da corrente elétrica. Os sinais obtidos na injeção de corrente no solo, também, são notoriamente mais fortes que os apresentados quando o eletrodo de corrente foi colocado no caule da planta, confirmando a diferença do fluxo de corrente apresentado pelas raízes e pelo solo. Durante o período de irrigação, foi possível verificar a remoção ou suavização de anomalias locais de fundo, para ambos os casos, fenômeno esse causado pela mudança da resistividade do solo após ter seu conteúdo de água alterado. Para a videira A, os resultados foram semelhantes.



Figura 2.107: Resultados do mise-à-la-masse para a Planta B. (a) eletrodo no caule no tempo  $T_0$ . (b) eletrodo no caule no tempo  $T_1$ . (c) eletrodo no solo no tempo  $T_0$ . (a) eletrodo no solo no tempo  $T_1$ . (e) Solução para um solo homogêneo (Mary et al., 2020)

A figura 2.108 apresenta as superfícies para a planta B em todos os tempos estimados, sendo visível a convergência para o ponto onde a corrente estava sendo injetada, na situação da injeção no solo, ao tempo em que, com a injeção de corrente na própria planta, as superfícies demonstraram variações relativas aos pontos raíz-solo, onde o consumo de água estava mais efetivo. As variações no formato destas superfícies demostram, ainda, a variação da posição das raízes ativas no consumo de água, principlamente durante o processo de irrigação  $(T_1)$ .



Figura 2.108: Superfícies para a Planta B (Mary et al., 2020)

Definida a região da raiz das plantas como as superfícies encontradas em  $T_0$ , foram levantadas as diferenças em eletrorresistividade nas regiões internas à esta superfície (IN) e externa à mesma (OUT). O diagrama da figura 2.109 representa os resultados desta análise para ambas as plantas, sendo aparente o decréscimo da resistividade elétrica após a irrigação em ambas as videiras, e em ambas as regiões.



Figura 2.109: Diagramas da distribuição de eletror resistividade observadas na variação dos tempos para as plantas  $A(a) \in B(b)$  (Mary et al., 2020)

Concluindo as análises realizadas neste experimento, a figura 2.110 apresenta a relação

entre a variação da quantidade de água simulada no solo, em relação ao tempo, localizada em cinco diferentes profundidades. Na profundidade z = 0 m, é observado um pico na quantidade de água até o final da irrigação em  $T_1$ , e uma decadência dessa medição, relativamente rápida logo em seguida. Entre  $T_1$  e  $T_2$ , a profundidade mais afetada pela irrigação ocorrida foi em z = 0, 2 m. Logo após, a infiltração chega na profundidade de z = 0, 4 m, durante a medição da eletrorresistividade em  $T_2$  e após o tempo  $T_3$ , a maior quantidade de água é observada na camada mais profunda, em z = 0, 8 m.



Figura 2.110: Variação no tempo da quantidade de água simulada em cinco profundidades (Mary et al., 2020)

#### Discussões e Conclusões

O método mise-à-la-masse, incorporando informações dos levantamentos de eletrorresistividade, foi fundamental para a análise não-invasiva do imageamento das raízes ativas e de suas atividades. Neste experimento, o sistema de raízes das plantas atuaram como o corpo condutor, de forma que, os locais onde a corrente injetada era transferida para o solo representavam os potenciais pontos onde as raízes interagiam com o solo para o consumo de água. Para tanto, foi necessário conhecer a resistividade elétrica do solo, através de levantamentos de eletrorresistividade.

A abordagem utilizada pode ser facilmente replicada em diferentes circunstâncias, e experimentos similares podem ser realizados em laboratórios, diante de novas evidências da distribuição das raízes para uma maior validação do método.

#### DISCUSSÃO

Dentro de todo o levantamento bibliográfico realizado para esta produção, o trabalho de Mary et al. (2020) foi o mais criativo quanto ao uso do método mise-à-la-masse. Neste artigo, o mise-à-la-masse foi aplicado para verificar o consumo de água pelas raízes de duas videiras durante um processo de irrigação, demonstrando, assim, uma nova aplicação para o método.

### 2.12 Resumo dos artigos

Com o intuito de condensar as informações sobre todos os artigos analisados, são apresentados, a seguir, um gráfico e uma tabela resumo sobre os trabalhos estudados. As representações informadas estão retratadas nas figuras 2.111 e 2.112.



Figura 2.111: Gráfico da proporção dos temas estudados

ARTIGOS EXPLANADOS NESTE TRABALHO								
Ano de publicação	Título	Autor(es)	Tema	Assunto				
1967	Three-dimensional electric mise-à-la- masse survey of an irregular lead-zinc- copper deposit in central Sweden	D.S. Parasnis	Exploração Mineral	Artigo utilizado como referência para diversos outros, ao demonstrar a aplicação do método estudado na delineação de corpos de minério.				
1991	Quantitative interpretation on three- dimensional mise-à-la-masse data. A case history from Gairloch, northwest Scotland	Annabel Bowker	Exploração Mineral	Confirmou a aplicação do método na mineração, além da sua utilidade para mapeamento de fraturas e descontinuidades.				
1997	Ground water modeling of mise-a-la-masse delineation of contaminated ground water plumes	James L. Osiensky	Águas Subterrâneas / Ambiental	Artigo demonstra a utilidade do método no mapeamento e estudo da evolução de plumas de contaminação.				
2000	The application od mise-à-la-masse and resistivity surveys to the detection of pollution from leaking sewers	Warwick Wood e Derecke Palmer	Águas Subterrâneas / Ambiental	Primeiro trabalho apresentado desenvolvido em área urbana. Mostrou a possibilidade de mapear o encanamento de esgotos, na busca por vazamentos.				
2002	Using mise-a-la-masse to delineate the migration of a conductive tracer in partially saturated basalt	Robin E. Nimmer e James L. Osiensky	Águas Subterrâneas / Ambiental	Demonstrou a delineação da migração de determinado fluido em uma zona fraturada.				
2003	Mise-à-la-masse technique in establishing the lateral extension of fractures in hard rocks	Dewashish Kumar, N.S. Krishnamurthy, Shakeel Ahmed, S.C. Jain and R.L. Dhar	Exploração Mineral	Esse trabalho permitiu a correlação de dados de diversos poços, para conseguir delinear fraturas na região.				
2004	Tracing groundwater flow by mise-à-la- masse measurement of injected saltwater	Surendra Raj Pant	Águas Subterrâneas / Ambiental	Utilizou da análise do comportamento de uma concentração salina, para estudar o fluxo das águas subterrâneas da região.				
2005	Three-dimensional modeling and inversion of the mise-à-la-masse data using a steel- casing borehole	Hideki Hatanaka, Tetsuo Aono, Hideki Mizunaga e Keisuke Ushijima	Exploração Mineral / Águas Subterrâneas	Baseado no mise-à-la-masse, é apresentado o método da Tomografia de Fluxo de Fluidos, que permite monitorar fluidos e imagear fraturas.				
2013	Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise- à-la-masse method	Lorenzo De Carlo, Maria Teresa Perri, Maria Clementina Caputo, Rita Deiana, Michele Vurro e Giorgio Cassiani	Ambiental / Engenharia	Foram realizados estudos utilizando o mise-à-la-masse e a eletrorresistividade para verificar a integridade do forro, em um aterro sanitário.				
2019	Application of the mise-à-la-masse method to detect the bottom leakage of water reservoirs	C. Ling, A. Revil, Y. Qi, F. Abdulsamad, P. Shi, Sylvie Nicaise, Laurent Peyras	Ambiental / Engenharia	Artigo apresenta o uso do método de forma experimental (em laboratório) e prática. Experimento buscou detectar vazamentos em reservatórios de água.				
2020	Time-lapse monitoring of root water uptake using electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse: a vineyard infiltration experiment	Benjamin Mary, Luca Peruzzo, Jacopo Boaga, Nicola Cenni, Myriam Schmutz, Yuxin Wu, Susan S. Hubbard e Giorgio Cassiani	Ambiental / Engenharia	Neste artigo, foi verificado o consumo de água pelas raízes de duas videiras durante um processo de irrigação, demonstrando, assim, uma nova aplicação para o método.				

Figura 2.112:	Tabela	$\operatorname{resumo}$	$\operatorname{dos}$	artigos	estudados
---------------	--------	-------------------------	----------------------	---------	-----------

## Conclusão

Os métodos geofísicos, no geral, são métodos não invasivos e de menores custos para resolver problemas ambientais e de engenharia. Neste contexto, os métodos geoelétricos se destacam, principalmente, para encontrar a profundidade do lençol freático e do embasamento, identificar diferentes litologias, mapear plumas de contaminação e explorar depositos de minérios. Contudo, com a evolução dos métodos elétricos, novas formas de aquisição surgiram, como o método mise-à-la-masse, que aparece no mapeamento de corpos eletricamente condutivo.

O uso convencional do método mise-à-la-masse era limitado para o estudo de corpos de minérios condutivos. Todavia, os artigos analisados neste trabalho demonstraram a utilização deste método para as mais variadas aplicações, sendo possível verificar a sua aplicabilidade em imageamento de minérios e fraturas e a análise do comportamento de plumas de contaminação, vazamentos, fluxos de água e traçadores, bem como a possibilidade de caracterização de um aterro sanitário e a análise do comportamento de raízes com relação ao consumo de água.

A análise temporal permite concluir que, no passado, o método era utilizado praticamente de forma exclusiva para o campo da mineração, porém, progressivamente, foi adentrando o universo da geofísica ambiental, sendo empregado em áreas relacionadas a poluição e vazamentos, por exemplo. O exemplo mais recente apresentado já aponta a forma mais inventiva do uso do método estudado, ao tentar mapear e analisar o comportamento de raízes de videiras.

Não poderia deixar de pontuar a fundamental importância da correlação entre os dados obtidos dos levantamentos do mise-á-la-masse e das aquisições de eletrorresistividade, apresentadas em diversos artigos estudados, mostrando que os métodos geofísicos dependem, de certa forma, um dos outros, e o mise-à-la-masse segue a regra.

Outra característica interessante é a variedade de possibilidades que se pode trabalhar com este método, uma vez que, por exemplo, em um dos estudos, um ser vivo (videira) foi utilizado como corpo condutor, enquanto em outro, o próprio invólucro do poço atuou como eletrodo de corrente. Desta forma, a criatividade pode levar as aplicações do método mise-à-la-masse a cenários, hoje, inimagináveis. Por fim, sugere-se que estudos futuros busquem focar as limitações do método e os possíveis novos usos para o mesmo, com o intuito de ampliar ainda mais a gama de possibilidades de utilização do Método Mise-à-la-masse. Além disso, o desenvolvimento da teoria sobre o método pode ser enriquecido, se encontrado mais material que assim o permita.

# Agradecimentos

"Podemos sempre escolher sermos gratos, não importa o que aconteça." – Dieter F. Uchtdorf

Gostaria de começar meus agradecimentos com a frase acima, pois tudo nas nossas vidas, por mais desafiador que seja, tem o seu lado positivo. Depende de nós alterarmos a nossa percepção quanto à esta questão, para aprendermos a apreciar os ensinamentos de todas as experiências que passamos. Desta forma, gostaria de agradecer, primeiramente, ao Criador e ao Universo por terem me porporcionado compreender esta questão e aberto os meus olhos para a imensidão de gratidão que hoje tenho, após todas as dificuldades que passei para finalizar este trabalho.

Seguindo com os meus agradecimentos, gostaria de pontuar pessoas que me orientaram no meu crescimento pessoal, diante de todo o transtorno que obtive durante o longo período de escrita deste TCC. Uma vez que necessitei encontrar o meu equilíbrio corpo-mente-espírito para, finalmente, conseguir concluir este tão almejado trabalho de conclusão.

No campo da mente, não teria conseguido sem a minha psicóloga Ana Rêgo. Ana, sou muito grato por todas as suas orientações e pelo seu acompanhamento. Tem muito de você neste trabalho.

Nos cuidados do corpo, sou, extremamente, grato à minha nutricionista Thaise Ramos, que me regenerou e me incentivou a encontrar a equipe LIVMEN, a qual deixo os meus agradecimentos registrados também. Sinto que sou uma nova pessoa graças a vocês.

Entrando na seara espiritual, meus agradecimentos vão para o ser de luz que é a Defensora Pública Kamile Costa Alves e o ser humano especial que é o meu amigo Flávio, pois ambos me ensinaram bastante sobre este assunto e me guiaram de forma que talvez eles nem saibam o quanto.

Diante da paz que encontrei cuidando de mim nestes três quesitos, este trabalho pôde ser concluído, de forma que serei eternamente grato a todos que me auxiliaram nestas questões.

Passando para as pessoas que estiveram ao meu lado, sou incrivelmente rico por ter amigos e familiares sempre me dando apoio. Agradeço a toda a minha família, em especial minha mãezinha Evanildes, minhas irmãs e tias. Não listarei os nomes para não entristecer alguém que por um acaso não venha a ser listado, mas todos que estiveram ao meu lado, sabem quem são e sabem que sempre terão o meu mais sincero amor.

Aos meus amigos, sou grato pelas palavras de sabedoria e incentivo, pelas perguntas de precupação e, até mesmo, pelas brincadeiras saudáveis de puxões de orelha. Em especial, sou pura gratidão aos meus amigos da universidade: Adilson, Àgatha, Fernanda, Hellen, Marina, Pablo, Patrícia, Rafael e Ramón; aos meus amigos que conheci em um ambiente profissional e se tornaram família: Adriano, Camilla, Flávio, Gabriel e Regane; e a minha grande amiga, desde a época de escola, Mayara.

Não posso deixar de agradecer imensamente a minha orientadora, a professora Dra Susana Cavalcanti, que sempre teve paciência e carinho com a minha pessoa, e sem a qual, tenho certeza que este trabalho não teria saído. Muito obrigado, professora!

Finalizo agradecendo a Vida e deixando registrado um mantra simples e poderoso, para uma vida mais próspera e feliz:

"Sinto muito. Me perdoe. Eu te amo. Eu sou grato."

Vida, me surpreenda!

### Referências

- Bowker, A. (1991) Quantitative interpretation on three-dimensional mise-à-la-masse data. A case history from Gairloch, northwest Scotland, Geoexploration, **28**:1–22.
- Braga, A. (2016) Geofísica aplicada: métodos geoelétricos em hidrologia, Oficina de Textos, São Paulo.
- De Carlo, L.; Perri, M. T.; Caputo, M. C.; Deiana, R.; Vurro, M. e Cassiani, G. (2013) Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-àla-masse method, Journal of Applied Geophysics, **98**:1–10.
- Gallas, J. D. F. (2005) O método do potencial espontâneo (sp) uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais, Revista Brasileira de Geofísica, **23**:133–144.
- Hatanaka, H.; Aono, T.; Mizunaga, H. e Ushijima, K. (2005) Three-dimensional modeling and inversion of the mise-a-la-masse data using a steel- casing borehole, Proceedings World Geothermal Congress.
- Kearey, P.; Hill, I. e Brooks, M. (2009) Geofísica de Exploração, Oficina de Textos, São Paulo.
- Kirsch, R. (2006) Groundwater Geophysics A tool for hidrogeology, Springer, Flintbek Germany.
- Kumar, D.; Krishnamurthy, N. S.; Ahmed, S.; Jain, S. C. e Dhar, R. L. (2003) Mise-à-lamasse technique in establishing the lateral extension of fractures in hard rocks, Journal Geological Society of India, 61:185–194.
- Ling, C.; Revil, A.; Qi, Y.; Abdulsamad, F.; Shi, P.; Nicaise, S. e Peyras, L. (2019) Application of the mise-à-la-masse method to detect the bottom leakage of water reservoirs, Engineering Geology, 261:146–165.
- Lowrie, W. (2007) Fundamentals of Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge, 2<sup>o</sup> edic..

- Mary, B.; Peruzzo, L.; Boaga, J.; Cenni, N.; Schmutz, M.; Wu, Y.; Hubbard, S. S. e Cassiani, G. (2020) Time-lapse monitoring of root water uptake using electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse: a vineyard infiltration experiment, SOIL, 6:95–114.
- Nimmer, R. E. e Osiensky, J. L. (2002) Using mise-a-la-masse to delineate the migration of a conductive tracer in partially saturated basalt, **9**:81–87.
- Osiensky, J. L. (1997) Ground water modeling of mise-a-la-masse delineation of contaminated ground water plumes, Journal of Hidrology, **197**:146–165.
- Pant, S. R. (2004) Tracing groundwater flow by mise-a-la-masse measurement of injected saltwater, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 9:155–165.
- Parasnis, D. S. (1967) Three-dimensional electric mise-à-la-masse survey of an irregular leadzinc-copper deposit in central Sweden, Geophysical Prospecting, 15:407 – 437.
- Reynolds, J. M. (2011) An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, Wiley-Blackwell, 2<sup>o</sup> edic..
- Sato, H. K. (2002) Métodos Elétricos Notas de Aula, Salvador BA.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P. e Sheriff, R. E. (1990) Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge, 2<sup>o</sup> edic..
- Vosgerau, D. S. A. R. e Romanowsk, J. P. (2014) Estudos de revisão: implicações conceituais e metodológicas, Rev. Diálogo Educ., **41**:165–189.
- Wood, W. e Palmer, D. (2000) The application of mise-à-la-masse and resistivity surveys to the detection of pollution from leaking sewers, Exploration Geophysics, **31**:515–519.