

UM CASO DE SUCESSO DE PESQUISA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA, COM MÉTODO ELÉTRICO DE RESISTIVIDADE

Jairo Santos Vieira¹; Daniele Di Giorgio² & Hélio Lengler³

RESUMO --- O referido trabalho tem por objetivo mostrar a utilização, com sucesso, da técnica de geofísica de Resistividade Elétrica aplicada em terreno com embasamento basáltico, para prospecção de água subterrânea, em uma empresa da região, cerca de dois quilômetros a noroeste da cidade de Farroupilha, Rio Grande do Sul. Nessa pesquisa usou-se o arranjo dipolo-dipolo, porque permite uma maior profundidade de pesquisa, em relação ao limite que se possui à extensão das linhas de caminhamento geo-elétrico. Foram feitos dois perfis, perpendiculares à(s) estrutura(s) existente(s) na região. Essas estruturas haviam sido identificadas anteriormente, através de aerofotogrametria. Nos dois perfis executados, um deles possuía 176,3 metros com 14 espaçamentos e o outro com 195,26 metros e 14 espaçamentos, ambos com 15 estacas. A partir dessas medições realizou-se o processamento computacional dos dados obtidos, com utilização de software adequado. Com os resultados desse processamento foram modelados três cenários possíveis, da situação geológica no terreno

Marcaram-se os locais para a perfuração, onde havia maior probabilidade de ocorrência de água.

Posteriormente a esse trabalho, foram executadas as perfurações nos dois locais. Encontrado o lençol freático, obteve-se, a partir de então, vazões em um dos poços de 5 m³ /H e no outro 20 m³ /H.

ABSTRACT--- The related work objectives to show the use, successfully, of the technique of geophysics of applied Electric Resistivity in basaltic basement, for underground water prospecting, in a region, about two kilometers to northwest from Farroupilha city, Rio Grande do Sul. In this research we used the arrangement dipole-dipole, because it allows a bigger depth of research, in relation to the limit of the extension of the lines of geo-electric path. Two profiles had been made, perpendiculars to the structures in the region. These structures had been identified previously, through air-fotogrametry. In the two executed profiles, one of them had 176.3 meters and the other with 195.26 meters, both with 15 stake. After, was marked the computational processing of these measurements using the adequate software. With the results of this processing three possible scenes had been shaped, of the geologic situation. Then was marked the places for the perforation, where it had greater probability of water occurrence. Later to this work, the perforations in the two places had been executed. Found the freatic level, it was gotten one outflows of 5 m³ /H from this well and 20 m³ /H. from the other.

Palavras-Chave – Resistividade Elétrica, geo-elétrico, modelados.

¹ Mestre em Engenharia de Minas pela UFRGS: R. Padre Todesco 875, Porto Alegre, CEP: 91520-360, F.: 33397641 Cel.: 51 81571535

² Mestre em Engenharia de Minas pela UFRGS: Av. Alegrete 318/304, Porto Alegre, CEP:90460-100, F.: 33311420 Cel.:51 81128481

³ Doutor em Engenharia de Materiais pela UFRGS: R. Desembargador Pedro Silva 400/703, Criciúma, CEP 88802-300, F.: 48 34300648

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi executado com a finalidade de verificar a melhor posição a ser situado um poço artesiano, no pátio de uma fábrica em que o subsolo consistia de basaltos aferentes a Formação Geral. Foram realizados dois perfis de eletro resistividade nas áreas de interesse para a locação do poço. As linhas para perfilagem foram locadas pelo topógrafo contratado da empresa e dispostas aproximadamente paralelas, uma a outra e foram estabelecidas de modo a cortarem a possível falha quase perpendicularmente.

Os perfis de eletroresistividade foram executados com 15 eletrodos. Ao todo, foram 496 metros de perfilagem elétrica e os trabalhos de campo foram executados no dia 27/12/2005.

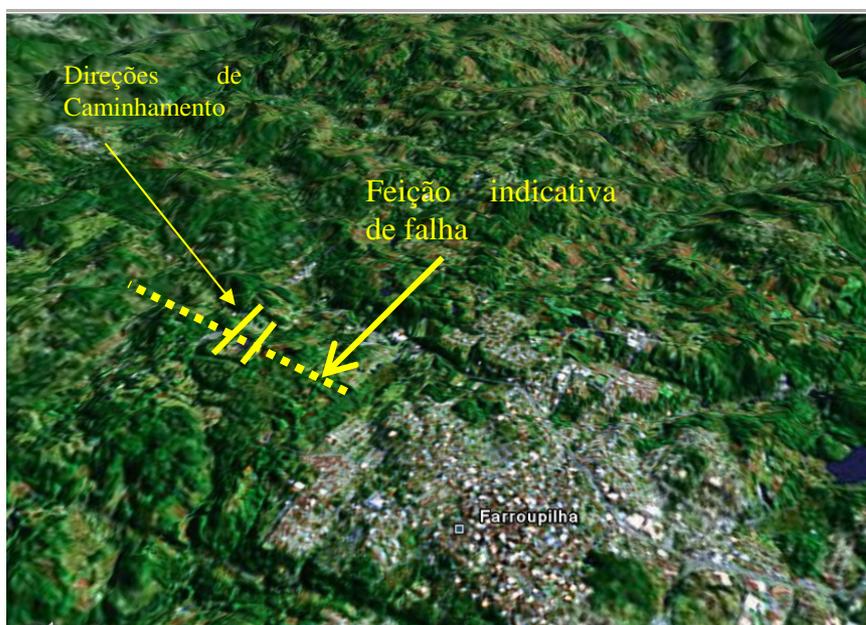


Figura 1. Vista panorâmica da cidade de Farroupilha (RS), onde aparece à indicação de falha e as direções dos dois caminhamentos. (Imagem obtida pelos autores, a partir do software Google Earth).

1.1 Fundamentação teórica

A resistividade das camadas superficiais da Terra, até 15 km de profundidade, fundamentalmente a crosta terrestre, é controlada pela condução eletrolítica aquosa, pelos tipos e a quantidade de poros da rocha, pelas fraturas, falhas e zonas de cisalhamento.

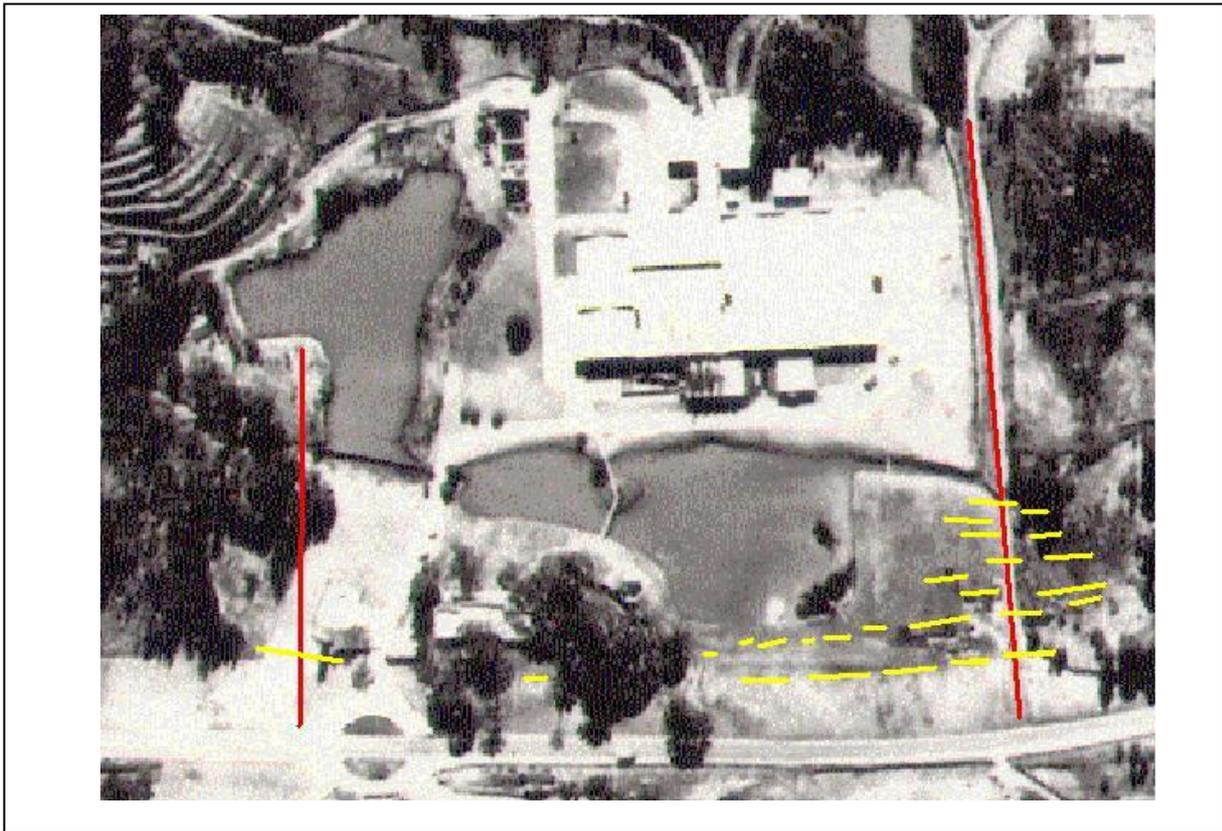


Fig. 2 Localização dos perfis (em vermelhos) de resistividade levantados no campo. Em amarelo estão marcadas as fraturas relacionadas à falha.

O aumento da resistividade, à medida que aumenta a profundidade, de 0 até 15 Km, deve-se a redução da porosidade das zonas de fratura, de falha e das zonas de cisalhamento, devido ao aumento da pressão litostática; muito embora se saiba que as fraturas e as falhas possam se manter abertas a grandes profundidades, devido a saída de carga litostática, sempre que o tensor de tensão for outro que não o vertical. Entretanto o interesse maior, nesse trabalho, é em profundidades entre 5 e 48 m.

A resistividade ρ verdadeira, de um solo homogêneo e isotrópico, pode ser calculada pela fórmula:

$$\rho = RK, \quad \text{Eq. 01}$$

onde R é a resistência elétrica e K um fator de forma. Já, para um solo não homogêneo e/ou anisotrópico, a resistividade, assim calculada, variará com a posição e/ou com a direção em que o arranjo dos eletrodos for colocado. O valor medido da resistividade aparente para cada posição e/ou orientação do arranjo dos eletrodos, variará em instância posterior. Cada medida é, na verdade, a resistividade aparente de um meio isotrópico homogêneo equivalente.

Assim, o método resistivo fornece uma secção geológica que diagnostica camadas e/ou a presença ou não de inhomogeneidades resistivas ou condutivas numa normalização útil para um dado arranjo de eletrodos.

1.1.1 Arranjo

Existem vários arranjos de eletrodos que se pode utilizar em prospecção geométrica de resistividade.

O arranjo usado nesse trabalho foi o de Dipolo-Dipolo. Isso se deve ao fato de que precisou-se determinar, em profundidade, as estruturas rochosas e também se quis atingir a maior profundidade possível de pesquisa na sondagem.

O método eletrorresistivo demonstra-se útil para localizar contatos entre regiões no subsolo que possuem diferentes resistividades, isto é, grandes o suficiente para serem detectadas.

Como o objetivo desse trabalho era delimitar a posição da estrutura, e, seu respectivo comportamento estrutural e no subsolo, foram estabelecidos e nivelados dois perfis nas áreas pertencentes ao pátio da fábrica.

Foram realizadas sondagens geométricas, através do uso de eletrodos dispostos segundo o arranjo de Dipolo-Dipolo.

Nesse arranjo os eletrodos de potencial estão no exterior do segmento determinado pelos eletrodos de corrente tendo cada par, uma separação mútua constante “a” e entre cada par de eletrodos uma distância de separação de “n·a” com “n” inteiro. O fator de forma K é calculado, no arranjo tipo Dipolo-Dipolo, com a seguinte equação, onde π é a constante 3,14 e “a” é o tamanho do espaçamento entre as estacas:

$$K = \pi n(n+1)(n+2)a \quad (02)$$

O procedimento do cálculo de K se baseia no fato de que, a fração da corrente elétrica introduzida no solo, que penetra até certa profundidade, aumenta conforme a separação dos eletrodos de corrente, isto quando se considera um meio homogêneo. Assim, sonda-se o terreno aplicando-se um pulso elétrico quadrado de corrente, nos eletrodos de corrente e capta-se a tensão nos eletrodos de tensão.

O processo é executado variando-se o valor de n desde o valor 1 até o espaçamento atingir as últimas estacas de sondagem. Para meios não homogêneos ter-se-á uma relação entre a corrente elétrica e o meio. Assim, deve-se fazer uma série de suposições, de simplificações para que se obtenha uma resposta aceitável sob o ponto de vista físico e geológico.

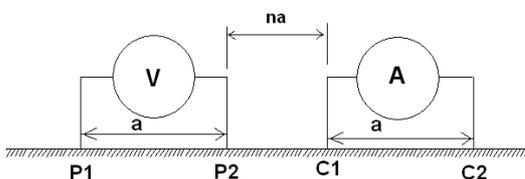


Figura 3. Essa figura mostra a disposição dos eletrodos no arranjo Dipolo-Dipolo, onde V representa um voltímetro e A um amperímetro. Os pontos C₁ e C₂ representam os terminais de corrente e V₁ e V₂ representam os terminais de tensão, ambos os pares, espaçados de “a”. (Figura criada pelos autores).

2. LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Localizada a direção que o perfil deve seguir, colocam-se as estacas no solo, em distâncias regulares, e fazem-se as medidas de resistência, lidas no resistivímetro. A partir daí, organizam-se tabelas com os diversos espaçamentos entre estacas.

Obtido o banco de dados passo seguinte é calcular as resistividades aparentes, a partir das resistências lidas a campo, através da equação abaixo, que é a substituição da equação 02 na 01:

$$\rho = R \pi n(n+1)(n+2)a \quad (03)$$

onde R é a resistência medida do terreno a o espaçamento entre os eletrodos e n o múltiplo do espaçamento usado. na interpretação das sondagens elétricas, é o traçado das curvas das resistividades aparentes calculadas mediante as equações das resistividades juntamente com os valores das resistências elétricas.

As curvas de iso-resistividade agora são determinadas com modelamentos matemáticos efetuados através de softwares aplicativos de inversão, baseados em diferenças finitas e elementos finitos.

3. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados das medidas de resistência do terreno nos dois perfis e os relativos cálculos de

resistividade são expostos na Tabela 1. A primeira coluna é a origem do arranjo enquanto a, n, K, ρ e R derivam das formulas (1), (2) e (3).

Nesse estágio o programa calcula e apresenta os diagramas de pseudo-seção das resistividades aparentes e calculadas e, por fim, o modelo de inversão de resistividade da secção.

Tabela 1 - Medidas de resistência do terreno e os relativos cálculos de resistividade (continua).

X1	a1	n	ρ_1	K1	R1	X2	a2	n	ρ_2	K2	R2
0	20	1	82.90	376.8	0.22	0	13.4	1	15.15	252.456	0.06
0	20	2	75.36	1507.2	0.05	0	13.4	2	30.29	1009.824	0.03
0	20	3	75.36	3768	0.02	0	13.4	3	227.21	2524.56	0.09
0	20	4	150.72	7536	0.02	0	13.4	4	555.40	5049.12	0.11
0	20	5	395.64	13188	0.03	0	13.4	5	530.16	8835.96	0.06
0	20	6	422.02	21100.8	0.02	0	13.4	6	1837.88	14137.536	0.13
0	20	7	633.02	31651.2	0.02	0	13.4	7	6786.02	21206.304	0.32
0	20	8	904.32	45216	0.02	0	13.4	8	7573.68	30294.72	0.25
0	20	9	497.38	62172	0.008	0	13.4	9	7081.39	41655.24	0.17
0	20	10	828.96	82896	0.01	0	13.4	10	7220.24	55540.32	0.13
0	20	11	1077.65	107764.8	0.01	0	13.4	11	8664.29	72202.416	0.12
20	20	1	82.90	376.8	0.22	13.4	13.4	1	2.52	252.456	0.01
20	20	2	150.72	1507.2	0.1	13.4	13.4	2	141.38	1009.824	0.14
20	20	3	565.20	3768	0.15	13.4	13.4	3	429.18	2524.56	0.17
20	20	4	1431.84	7536	0.19	13.4	13.4	4	454.42	5049.12	0.09
20	20	5	1186.92	13188	0.09	13.4	13.4	5	1767.19	8835.96	0.2
20	20	6	2532.10	21100.8	0.12	13.4	13.4	6	7917.02	14137.536	0.56
20	20	7	2848.61	31651.2	0.09	13.4	13.4	7	8270.46	21206.304	0.39
20	20	8	3165.12	45216	0.07	13.4	13.4	8	7876.63	30294.72	0.26
20	20	9	9325.80	62172	0.15	13.4	13.4	9	7914.50	41655.24	0.19
20	20	10	18237.12	82896	0.22	13.4	13.4	10	8886.45	55540.32	0.16
40	20	1	60.29	376.8	0.16	26.8	13.4	1	302.95	252.456	1.2
40	20	2	346.66	1507.2	0.23	26.8	13.4	2	1252.18	1009.824	1.24
40	20	3	942.00	3768	0.25	26.8	13.4	3	1640.96	2524.56	0.65
40	20	4	452.16	7536	0.06	26.8	13.4	4	6462.87	5049.12	1.28
40	20	5	1318.80	13188	0.1	26.8	13.4	5	33311.57	8835.96	3.77
40	20	6	1055.04	21100.8	0.05	26.8	13.4	6	34919.71	14137.536	2.47
40	20	7	1582.56	31651.2	0.05	26.8	13.4	7	36686.91	21206.304	1.73
40	20	8	4521.60	45216	0.1	26.8	13.4	8	38474.29	30294.72	1.27
40	20	9	9325.80	62172	0.15	26.8	13.4	9	45404.21	41655.24	1.09
60	20	1	64.06	376.8	0.17	40.2	13.4	1	7.57	252.456	0.03
60	20	2	406.94	1507.2	0.27	40.2	13.4	2	40.39	1009.824	0.04
60	20	3	452.16	3768	0.12	40.2	13.4	3	479.67	2524.56	0.19
60	20	4	1808.64	7536	0.24	40.2	13.4	4	2777.02	5049.12	0.55
60	20	5	1846.32	13188	0.14	40.2	13.4	5	3534.38	8835.96	0.4
60	20	6	2532.10	21100.8	0.12	40.2	13.4	6	3817.13	14137.536	0.27
60	20	7	11077.92	31651.2	0.35	40.2	13.4	7	4241.26	21206.304	0.2
60	20	8	21703.68	45216	0.48	40.2	13.4	8	4847.16	30294.72	0.16
80	20	1	135.65	376.8	0.36	53.6	13.4	1	12.62	252.456	0.05
80	20	2	256.22	1507.2	0.17	53.6	13.4	2	323.14	1009.824	0.32
80	20	3	1168.08	3768	0.31	53.6	13.4	3	2852.75	2524.56	1.13
80	20	4	1808.64	7536	0.24	53.6	13.4	4	3786.84	5049.12	0.75

Tabela 1 - Medidas de resistência do terreno e os relativos cálculos de resistividade (continuação).

80	20	5	2505.72	13188	0.19	53.6	13.4	5	4506.34	8835.96	0.51
80	20	6	8651.33	21100.8	0.41	53.6	13.4	6	5230.89	14137.536	0.37
80	20	7	19307.23	31651.2	0.61	53.6	13.4	7	6998.08	21206.304	0.33
100	20	1	275.06	376.8	0.73	67	13.4	1	42.92	252.456	0.17
100	20	2	2306.02	1507.2	1.53	67	13.4	2	393.83	1009.824	0.39
100	20	3	4220.16	3768	1.12	67	13.4	3	656.39	2524.56	0.26
100	20	4	6857.76	7536	0.91	67	13.4	4	908.84	5049.12	0.18
100	20	5	26376.00	13188	2	67	13.4	5	1237.03	8835.96	0.14
100	20	6	60981.31	21100.8	2.89	67	13.4	6	1837.88	14137.536	0.13
120	20	1	22.61	376.8	0.06	80.4	13.4	1	646.29	252.456	2.56
120	20	2	527.52	1507.2	0.35	80.4	13.4	2	1504.64	1009.824	1.49
120	20	3	1281.12	3768	0.34	80.4	13.4	3	2575.05	2524.56	1.02
120	20	4	6104.16	7536	0.81	80.4	13.4	4	3736.35	5049.12	0.74
120	20	5	15429.96	13188	1.17	80.4	13.4	5	5566.65	8835.96	0.63
140	20	1	734.76	376.8	1.95	93.8	13.4	1	386.26	252.456	1.53
140	20	2	2019.65	1507.2	1.34	93.8	13.4	2	1120.90	1009.824	1.11
140	20	3	10701.12	3768	2.84	93.8	13.4	3	2145.88	2524.56	0.85
140	20	4	31048.32	7536	4.12	93.8	13.4	4	3635.37	5049.12	0.72
160	20	1	128.11	376.8	0.34	107.2	13.4	1	1173.92	252.456	4.65
160	20	2	2079.94	1507.2	1.38	107.2	13.4	2	3584.88	1009.824	3.55
160	20	3	7912.80	3768	2.1	107.2	13.4	3	7800.89	2524.56	3.09
180	20	1	489.84	376.8	1.3	120.6	13.4	1	588.22	252.456	2.33
180	20	2	2517.02	1507.2	1.67	120.6	13.4	2	1767.19	1009.824	1.75
200	20	1	342.89	376.8	0.91	134	13.4	1	330.72	252.456	1.31

Os perfis resistivos colocam-se na abscissa os valores de “a” em metros e nas ordenadas as profundidades, também em metros. Um código de cores é utilizado para ligar os pontos desse espaço, com iguais resistividades aparentes. Dessa forma explicita-se uma feição geológica possível para o local mostrando o perfil de resistividades aparentes que se relaciona às rochas de maior ou menor conteúdo de água e ou rochas com diferentes graus de trituração, rochas inconsolidadas ou rochas sólidas.

No modelo de inversão se representa uma das possíveis formas de configuração das rochas com suas respectivas resistividades aparentes. Após o processamento fez-se a correção topográfica do perfil.

Os gráficos a seguir consistem das pseudo-seções de resistividade medida, calculada e a representação gráfica do processo de inversão dos dados de resistividade. Foi usado o método de investigação cujo arranjo geométrico se costuma chamar de dipolo-dipolo o qual possibilita uma melhor resolução vertical aliada a um maior poder de penetração, mesmo usando um número relativamente limitado de eletrodos.

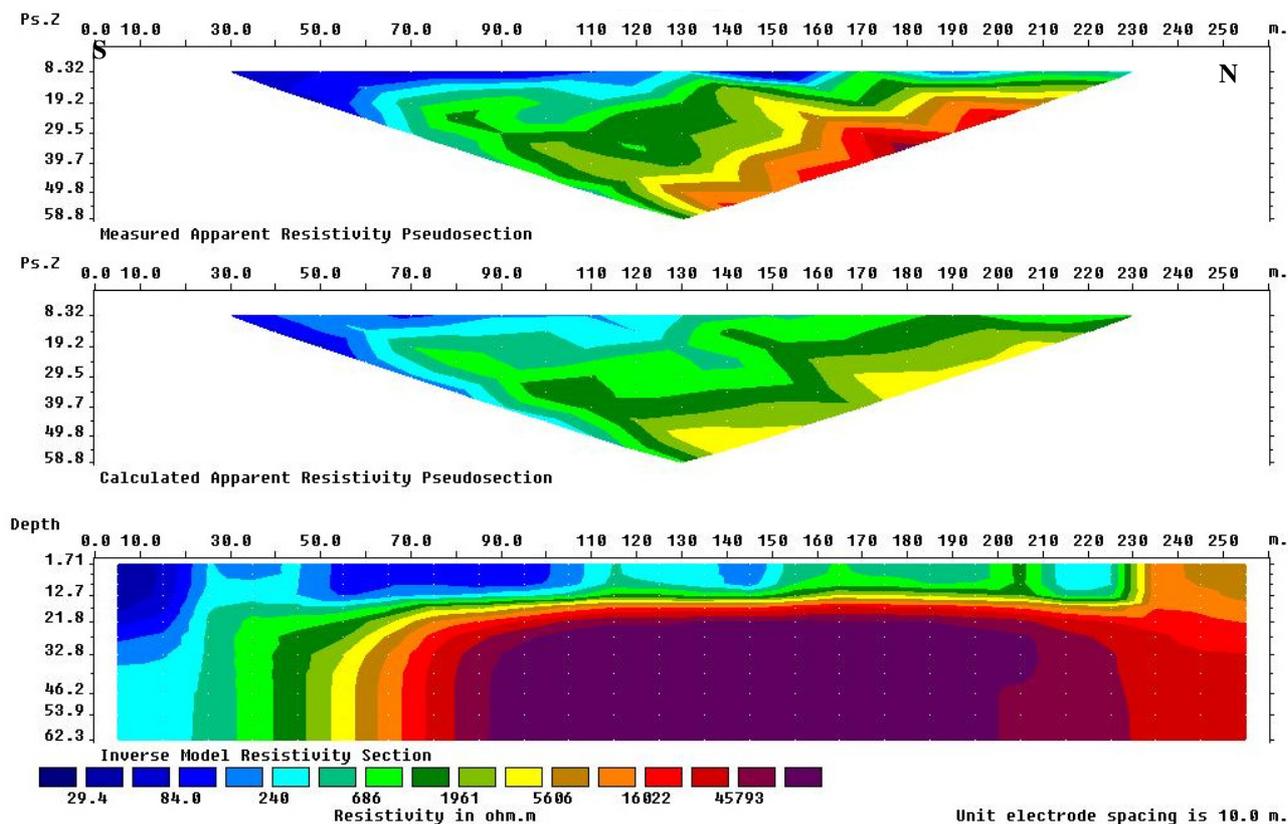


Figura 4 - Perfilagem elétrica do Perfil 1 pelo método de Dipolo-dipolo.(Modelo obtido pelo autor através do Software Resis2D).

Os resultados da inversão das medidas de resistividade aparente do terreno, obtidas através da utilização do método de Dipolo-dipolo (Fig. 5), evidenciam a existência de um corpo mais resistivo (16.000-46.000 Ωm) em profundidade, representado graficamente pelas cores amarronzadas até a roxa. Esse corpo se encontra à profundidade de cerca de 10-15 m e possui o topo em forma de superfície quase horizontal. A continuidade em profundidade extrapola o poder de investigação do geo-resistivímetro, em razão do limite de extensão disponível para a disposição do arranjo geométrico. Lateralmente, a uma distância de cerca de 240 m, este corpo mais resistivo apresenta-se truncado verticalmente (falha normal). Desse modo, os valores de resistividade mais baixos (240 Ωm), representadas pelas cores azuladas, esverdeadas e amarelas, aparecem na parte lateral da pseudo-seção e como cobertura do corpo resistivo acima descrito.

Propõe-se que o corpo resistivo coincide com o basalto, enquanto as partes menos resistivas agrupam os solos, os materiais alterados, o basalto decomposto, litotipos esses que sabidamente são encontrados na área em estudo.

As informações adicionais obtidas são, em primeiro lugar, acerca da profundidade de investigação. De fato, o corpo resistivo aparenta se estender em uma profundidade superior a 48 m. Secundariamente, na parte central da linha de investigação, é possível notar uma cobertura com

cerca de 15 m de espessura de material relativamente pouco resistivo a qual se estende lateralmente por aproximadamente 200 m ou mais. Possivelmente, trata-se de uma zona de material mais umedecido.

Zona de baixa resistividade em maior profundidade só pode ser vista na porção sul do perfil. Coincide com a faixa de domínio da rodovia, podendo esta representar uma região com espesso aterramento da estrada.

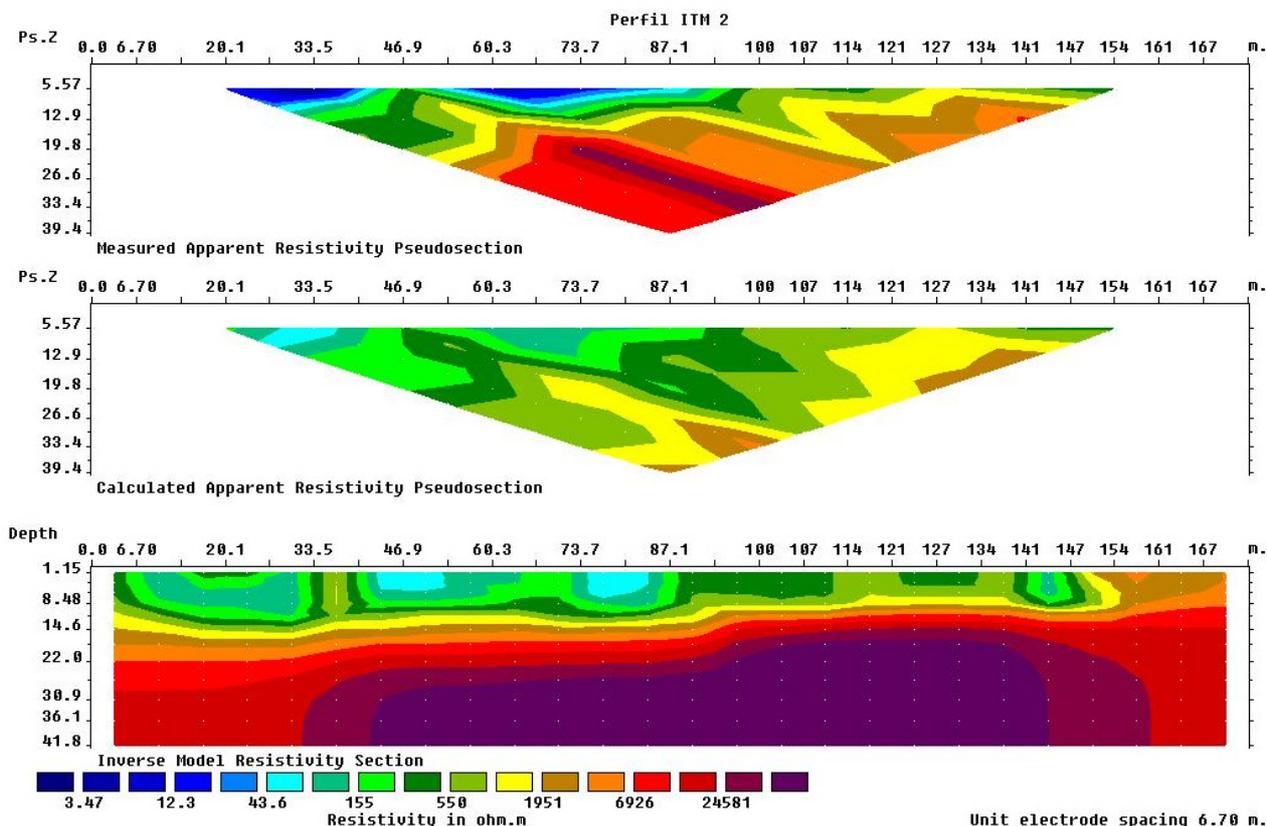


Figura 5. Perfilagem elétrica do Perfil 2 pelo método de Dipolo-dipolo, (modelo obtido pelos autores através do Software Resis2D).

As pseudo-seções mostradas na Fig. 5 apresentam, neste caso, a existência em profundidade, a cerca de 12 m, de um corpo resistivo cuja resistividade aparente situa-se entre 7000 e 24.000 $\Omega\cdot m$. Este corpo é evidenciado no modelo inverso da secção com cores que vão do amarelo ao roxo. Este corpo resistivo é o mesmo já identificado como corpo de diabásio no primeiro perfil. Este deve se estender à profundidade superior a 32 m, profundidade máxima de investigação com o método usado.

É possível notar que acima dessa região encontram-se materiais não consolidados, o solo, ou materiais alterados, ou basalto decomposto como argila, ou ainda, material com maior grau de umidade o que responderia à uma menor resistividade aparente ($<550 \Omega\cdot m$).

Também neste perfil, não é inequívoca a possibilidade de distinção entre basalto decomposto e solos menos umedecidos e o mais resistivo diabásio.

Nas Figs. 6 e 7, os prováveis cenários geológicos, dentre muitos possíveis, foram montados para dar uma interpretação sugestiva ao trabalho.

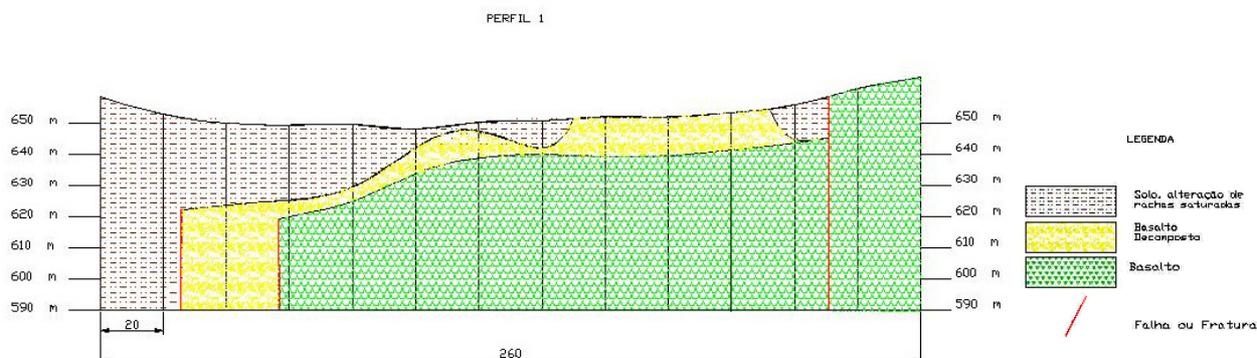


Fig. 6 - Interpretação geológica da tomografia elétrica relativa ao perfil 1. As linhas verticais indicam a posição dos eletrodos. Na parte inferior estão indicados extensão do perfil e espaçamento entre os eletrodos.

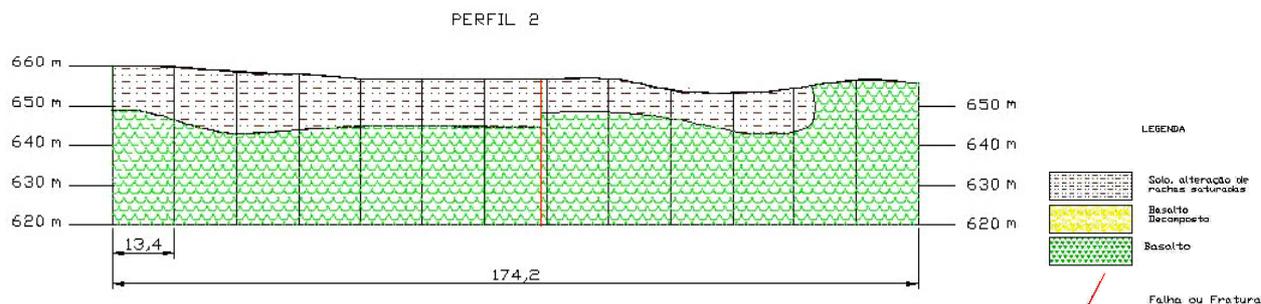


Fig. 7 - Interpretação geológica da tomografia elétrica relativa ao perfil 2. As linhas verticais indicam a posição dos eletrodos. Na parte inferior estão indicados extensão do perfil e espaçamento entre os eletrodos.

1. CONCLUSÕES

A perfilagem geolétrica executada nas áreas do pátio da fábrica, permitem sugerir as seguintes conclusões:

1) O diabásio contrasta fracamente com os materiais saturados, inclusive sua própria alteração.

2) As alterações do basalto, quando saturadas em água mostram valores de eletroresistividade extremamente baixos.

3) É visto um truncamento por falhas em um dos perfis executados, principalmente no perfil 1 onde não se registra a continuidade da estrutura na direção norte.

4) No perfil 2 verifica-se um espessamento maior das rochas em uma estrutura continuada na direção nordeste-sudoeste.

BIBLIOGRAFIA

Dobrin, M.B. 1988. *Introduction to Geophysical Prospecting*. Mc Graw-Hill. New York. 867p.

Frischknecht, F. C. & Keller, G.V.; 1970. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*, 1ª Ed., Oxford (USA), Pergamon Press, 517 p.

Loke & Penang, 1999 *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, A practical guide to 2-D and 3-D surveys*, Malaysia, 1999.

Parasnis, D.S.; 1997. *Principle of Applied Geophysics*, 2ª Ed., Chapman & Hall - London.

Robson, E. & Coruh, C. 1988. *Basic Exploration Geophysics*. John Wiley & Sons. New York. 562.

Sheriff, R.E. 1999. *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, p.384.

Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E. 1990, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, 770 p.

Ward, S.H. 1990. *Geotechnical and Environmental Geophysics (Investigations in Geophysics, N. 5)*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, pp. 147-189.