

Investigação Geoambiental de uma Área Contaminada por Resíduo Industrial

Alberto B. Lima e Silva, Nelson Oswaldo Luna Caicedo, Fernando Schnaid

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – IPH – UFRGS
albernd@yahoo.com.br ; caicedo@iph.ufrgs.br ; fernando@ufrgs.br

Recebido: 22/09/08 - revisado: 26/11/08 - aceito: 23/10/09

RESUMO

O presente trabalho apresenta os resultados de um estudo de investigação geoambiental realizado em um antigo depósito de resíduo industrial, através do uso combinado de métodos diretos (sondagens geológicas/geotécnicas e poços de monitoramento) e indiretos (geofísica de superfície por eletro resistividade e cone resistivo - RCPT) de investigação do subsolo. A partir de levantamentos de campo com a geofísica superficial por eletro resistividade, foram identificadas as zonas contaminadas do subsolo para o dimensionamento da rede de monitoramento do manancial subterrâneo. Sondagens verticais com o cone resistivo foram executadas para avaliar a profundidade da contaminação no perímetro do depósito e o comportamento elétrico do resíduo. Constatou-se que a pluma de contaminação formada a partir do depósito reduz a resistividade elétrica do conjunto solo-fluido intersticial das camadas do subsolo. As sondagens de cone resistivo possibilitaram identificar uma zona altamente contaminada com até 5 m de profundidade, caracterizada por valores baixos de resistividade. Os resultados das sondagens de RCPT foram comparados com os dados da campanha de geofísica de superfície, sendo observada compatibilidade entre eles a partir da profundidade de 5 m. Os níveis de contaminação no manancial subterrâneo, inferidos através dos ensaios de RCPT, foram comparáveis com os resultados das análises químicas e físico-químicas.

Palavras-chave: Resíduo Industrial; Contaminação do Subsolo; Resistividade; Cone Resistivo.

INTRODUÇÃO

A investigação geoambiental de áreas contaminadas é um processo que compreende a coleta e análise conjunta de dados como: (i) propriedades químicas e físico-químicas do meio geológico e dos contaminantes; (ii) estratigrafia do subsolo e características hidrogeológicas da área; (iii) magnitude, natureza e extensão da contaminação do solo, da água subterrânea e da água superficial.

Os métodos indiretos de investigação geoambiental como a geofísica superficial por eletro resistividade, o piezocone (CPTU - Piezocone Penetration Test) e o cone resistivo (RCPT - Resistivity Cone Penetration Test) podem ser empregados para estimar parâmetros geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos de interesse e identificar os locais com suspeita de contaminação. Estas ferramentas podem ser utilizadas para dar suporte à escolha dos locais para a caracterização direta de parâmetros e na definição dos pontos de amostragem do solo e da água subterrânea para verificar e monitorar os níveis de contaminação do subsolo.

Benson (1991) destaca que a eficiência dos métodos indiretos de investigação, como a geofísica

superficial e o cone resistivo, está associada à existência de contrastes bem definidos entre os valores de resistividade do local contaminado e do local de *background* (sem contaminação). Se o contraste não é mensurável, as zonas contaminadas não poderão ser identificadas.

ÁREA AVALIADA

A área avaliada, situada na região metropolitana de Porto Alegre/RS, está inserida na província geomorfológica denominada Depressão Periférica, cuja litologia é caracterizada pela presença de rochas sedimentares (argilitos e siltitos) pertencentes à Formação Sanga do Cabral, Grupo Rosário do Sul.

O antigo depósito de resíduo industrial possui uma área de 3,0 ha onde foram construídas valas com aproximadamente 30 m de comprimento por 4 m de largura e profundidades entre 2,0 e 2,5 m. Estas valas foram executadas diretamente sobre o solo sem nenhum sistema de impermeabilização e coleta de líquido percolado.

O resíduo (borra oleosa ácida) é constituído por uma mistura de compostos orgânicos e inorgâ

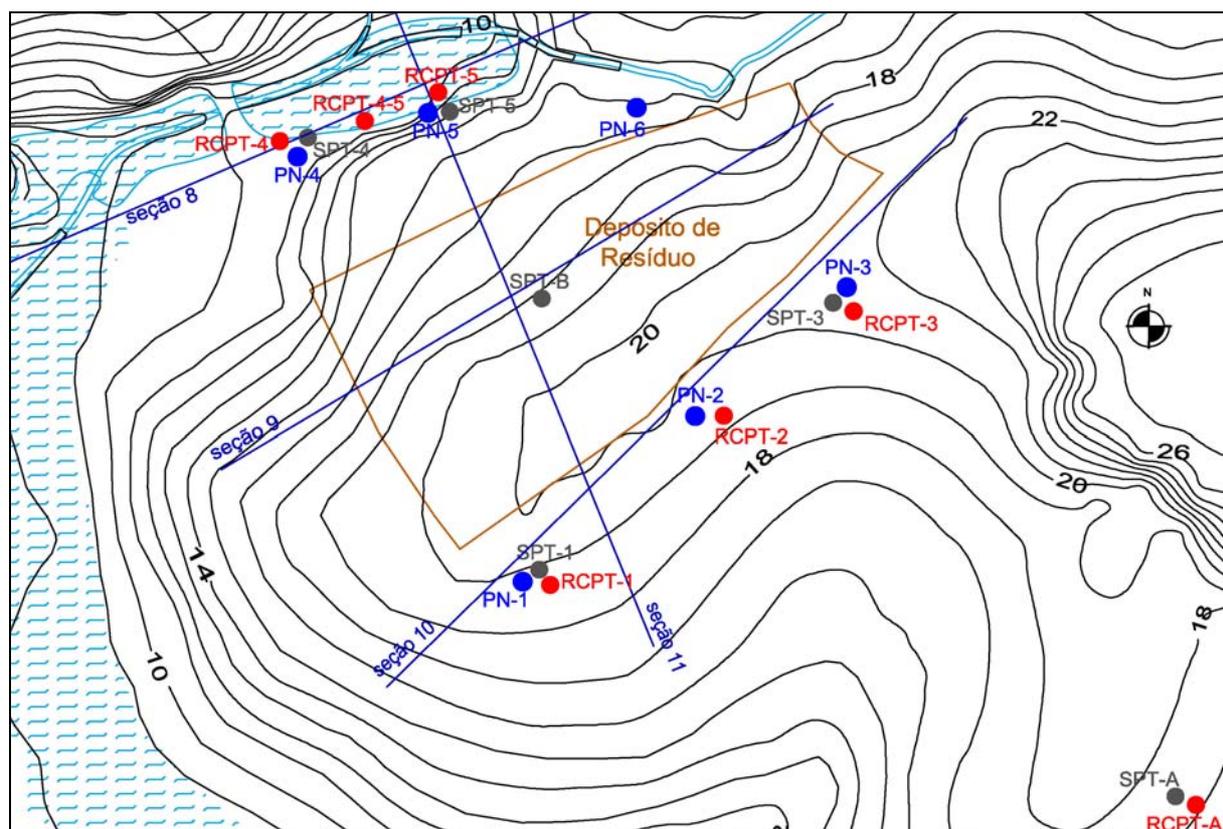


Figura 1 - Posição dos ensaios SPT, seções geofísicas, poços de monitoramento (PN) e ensaios de cone resistivo (RCPT) na área.

nicos, sendo a fração inorgânica composta por ácido sulfúrico e metais (Al, Fe, Pb e Zn). A fração orgânica (hidrocarbonetos de petróleo) é formada essencialmente por compostos de elevado peso molecular cuja solubilidade em água e mobilidade em subsuperfície são extremamente baixas.

SONDAGENS GEOFÍSICAS

No ano de 2003, a área foi objeto de um trabalho de avaliação da contaminação (Planigeo, 2003), onde foram utilizadas sondagens de geofísica superficial por eletro resistividade para definir a extensão e a profundidade das plumas de contaminação formadas a partir das valas de resíduo.

O arranjo de eletrodos adotado nos ensaios foi o Schlumberger com cabos multieletrodos e espaçamento de 3 m entre os eletrodos. Foram realizadas 4 linhas geofísicas com 245 m de comprimento e profundidade máxima de investigação de

25 m. Na Figura 1 está ilustrada a posição das sondagens geofísicas.

AVALIAÇÃO E MONITORAMENTO DO MANANCIAL SUBTERRÂNEO

Com base nos resultados das sondagens geofísicas, foi dimensionada a rede de monitoramento do manancial subterrâneo. Poços de monitoramento foram instalados em locais onde foram registradas anomalias nos valores de resistividade associadas a possíveis plumas de contaminação. A localização dos poços de monitoramento instalados na área é mostrada na Figura 1.

No total, seis poços de monitoramento foram construídos, sendo três posicionados a montante do depósito (PN-1, PN-2 e PN-3) e três a jusante (PN-4, PN-5 e PN-6). Todos os poços foram revestidos com tubo geomecânico (DN-50) e filtro com 1,0 m de comprimento.

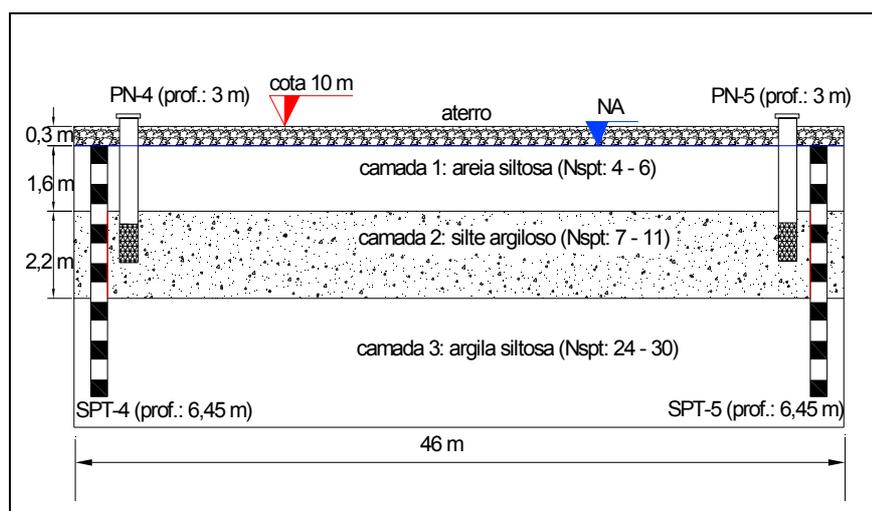


Figura 2 - Perfil estratigráfico do subsolo da área.

O coeficiente de condutividade hidráulica das camadas do subsolo foi determinado *in situ* através de ensaios de *slug test*. Na Tabela 1 são apresentados os valores do coeficiente de condutividade hidráulica estimados no campo.

Tabela 1 - Nível d'água nos poços de monitoramento e valores de condutividade hidráulica dos solos da área.

Poço de Monitoramento	Prof. (m)	NA (m)	Material	K (m/s)
PN-1	7,0	3,0	silte argiloso	$1,6 \cdot 10^{-7}$
PN-2	10,0	3,20	argila siltosa	$7,2 \cdot 10^{-9}$
PN-3	10,0	3,70	argila siltosa	$2,9 \cdot 10^{-9}$
PN-4	3,0	0,40	silte argiloso	$5,1 \cdot 10^{-8}$
PN-5	3,0	0,60	silte argiloso	$5,5 \cdot 10^{-8}$
PN-6	6,0	1,40	silte argiloso	$5,1 \cdot 10^{-8}$

Observa-se na Tabela 1 que os valores de condutividade hidráulica do subsolo são baixos e característicos de sedimentos de natureza argilosa e siltosa

SONDAGENS SPT

O trabalho de investigação complementar proposto teve início a partir de uma campanha de sondagens de simples reconhecimento dos solos da área, através do equipamento SPT (*Standard Penetration Test*). A Figura 1 esquematiza as sondagens SPT na área, junto com a posição dos ensaios de cone

resistivo (RCPT). Os ensaios foram executados em pontos próximos aos poços de monitoramento e às seções geofísicas.

Um local afastado do depósito foi selecionado para colher informações do *background* do subsolo (SPT-A) para os ensaios de cone resistivo. Uma sondagem sobre uma das valas de resíduo (SPT-B) foi realizada para analisar as características do material. Na Figura 2 é apresentado um perfil do subsolo da área elaborado a partir das sondagens SPT-4 e SPT-5.

Os dados fornecidos pelas sondagens SPT e os ensaios laboratoriais de caracterização das (granulometria) amostras mostraram que o subsolo é composto por um perfil residual com um provável substrato de argilito. Foram identificadas três unidades estratigráficas no subsolo. A primeira camada é composta principalmente pelas frações areia (29%-44%) e silte (28%-50%). Na segunda camada ocorre predominância das frações argila (24%-38%) e silte (29%-49%). A terceira camada é predominantemente argilosa (50%-66%). A partir da profundidade 8,5 m verifica-se o início do manto de alteração da rocha sedimentar (argilito), auferidas pelas altas quantidades de argila das amostras (70%-78%).

ENSAIOS DE CONE RESISTIVO

Os ensaios de cone resistivo foram realizados próximos às sondagens SPT e poços de monitoramento. Os objetivos desta campanha foram: (i) determinar a extensão em profundidade da conta

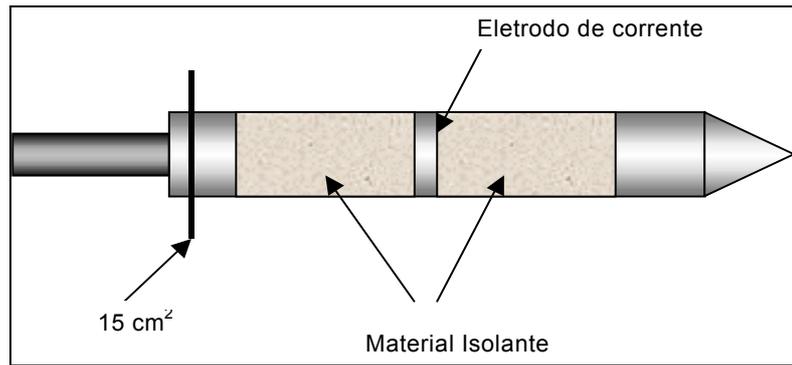


Figura 3 - Cone resistivo utilizado nos ensaios

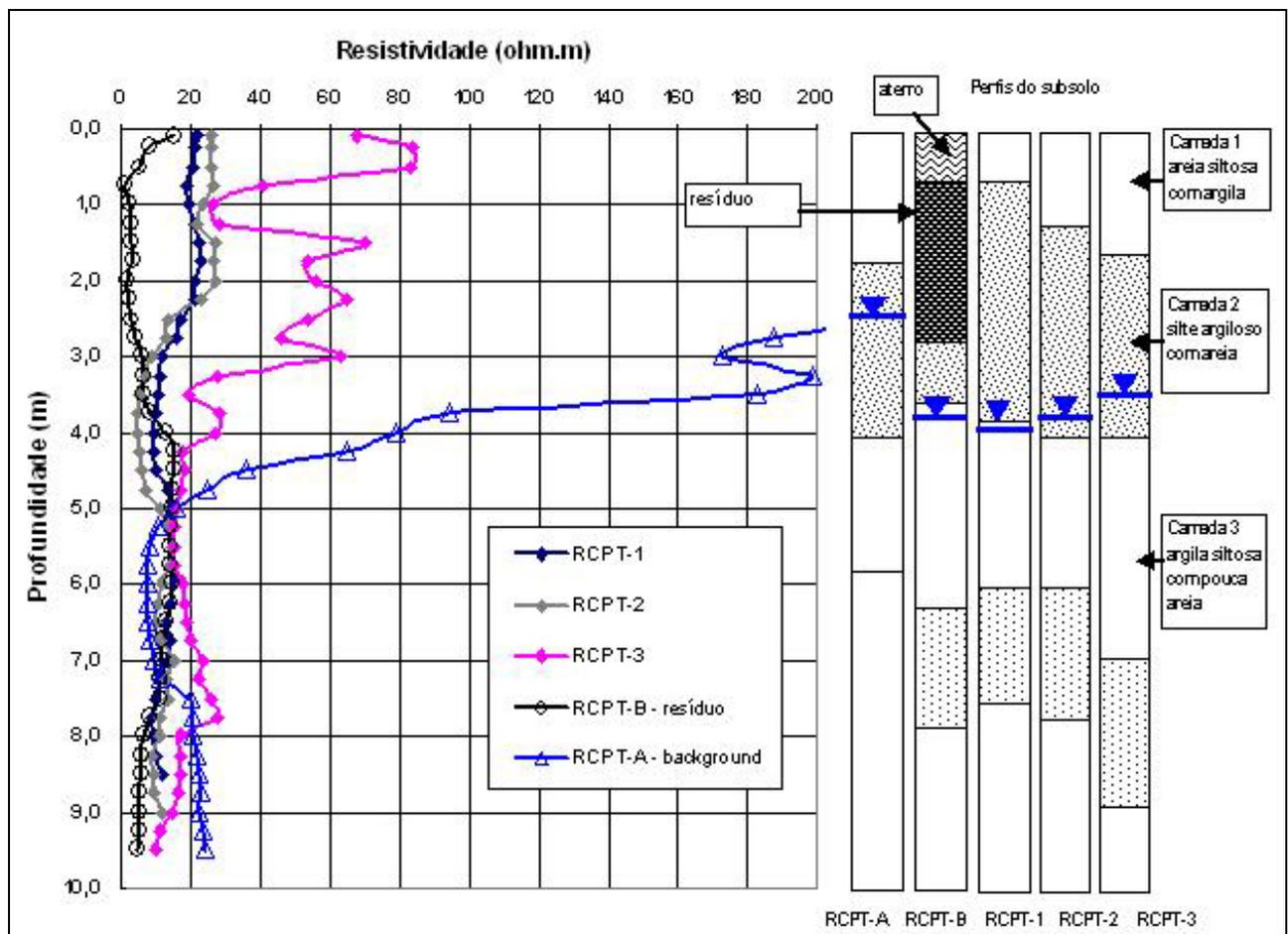


Figura 4 - Comparação dos ensaios de cone resistivo RCPT-1, RCPT-2, RCPT-3 e RCPT-B (*resíduo*) com o ensaio RCPT-A (*background*).

minação do subsolo até a profundidade de amostragem da água subterrânea; (ii) verificar o comporta-

mento elétrico do resíduo depositado; (iii) comparar os resultados com os dados da geofísica de su-

perfície e análises químicas e físico-químicas da água subterrânea.

O cone resistivo utilizado foi adquirido pela UFRGS em conjunto com a COPPE/UFRJ e UFPE (Figura 3). Neste equipamento, o eletrodo central emite uma corrente elétrica alternada (1000 Hz) de intensidade constante, sendo a diferença de potencial medida nos eletrodos de potencial que formam o corpo da ponteira. O cone resistivo possui quatro escalas de operação para a medição da condutividade elétrica que são: 0 a 400 μ S, 0 a 4 mS, 0 a 40 mS e 0 a 400 mS. A determinação da resistividade elétrica é feita através das curvas de calibração do equipamento que relacionam a tensão medida com a condutividade elétrica. Detalhes sobre o funcionamento e operação deste equipamento são apresentados por Nacci et. al (2003).

A campanha de ensaios de cone resistivo foi composta de 7 sondagens. A sondagem de RCPT-A (*background*) foi realizada em um local suficientemente afastado do depósito de resíduo e a sondagem RCPT-B foi executada sobre uma vala de borra oleosa ácida.

RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de RCPT estão ilustrados na forma de gráficos da variação da resistividade com a profundidade. Neste trabalho, o termo “contraste resistivo” é utilizado para definir a diferença entre os valores de resistividade medidos no *background* e nos locais com suspeita de contaminação.

Os resultados dos ensaios de cone resistivo RCPT-1, RCPT-2, RCPT-3 estão agrupados na Figura 4. Na Figura 5 constam os resultados das sondagens RCPT-4, RCPT-4-5, RCPT-5. Em todas as figuras, os resultados são comparados com os ensaios RCPT-A (*background*) e RCPT-B (resíduo). Também estão esquematizados os perfis estratigráficos e o nível d'água subterrâneo medido no momento da realização dos ensaios de RCPT. A escala máxima das figuras é de 200 ohm.m, embora a resistividade de *background* tenha atingido valores de até 500 ohm.m na camada superficial.

Destaca-se que os valores de resistividade da primeira camada no *background* não foram considerados nas análises, pois os dados são para a condição não saturada do solo.

O resultado da sondagem RCPT-B revela que o resíduo depositado (borra oleosa ácida) possui resistividade em torno de 2,5 ohm.m. A elevada concentração de compostos ionizáveis como o ácido sulfúrico confere ao material alta condutividade

elétrica. Percebe-se que os contaminantes lixiviados a partir da borra ácida reduzem a resistividade elétrica do conjunto solo-fluído intersticial das camadas de solo.

Na Figura 4 verifica-se que os maiores contrastes resistivos nas sondagens (RCPT-1, RCPT-2 e RCPT-3) ocorrem entre 2,5 e 5 m de profundidade. Nesta região os níveis de contaminação são elevados, pois os valores de resistividade são da mesma ordem de grandeza dos valores registrados entre 3 e 5 m de profundidade no local do ensaio RCPT-B (resíduo).

No local do ensaio RCPT-3, os níveis de contaminação são menores conforme pode ser visualizado na Figura 4. Entre 2,5 e 4,7 m os valores de resistividade são maiores do que nos locais dos ensaios RCPT-1 e RCPT-2, e a partir da profundidade 4,7 m os valores são da mesma ordem de grandeza até a profundidade de 6 m, mostrando, portanto, um indício de que a contaminação nesta região é mais intensa em relação às outras porções do subsolo.

Embora não seja possível estabelecer os contrastes resistivos entre os resultados dos ensaios RCPT-1, RCPT-2 e RCPT-3 com o *background*, entre 5,0 e 7,3 m de profundidade (na terceira camada), constata-se através da comparação com o resultado do ensaio RCPT-B (resíduo) que os níveis de contaminação nesta região são elevados. A partir da profundidade 7,5 m os contrastes resistivos indicam que o grau de contaminação da terceira camada é menor.

Por fim, a análise conjunta das verticais RCPT-1, RCPT-2 e RCPT-3 mostra que no subsolo onde a vertical RCPT-2 foi realizada a contaminação é mais intensa, pois os contrastes resistivos na zona saturada são maiores.

Através da comparação dos resultados dos ensaios RCPT-4, RCPT-4-5 e RCPT-5 com os dados do *background* (Figura 5) identifica-se as anomalias associadas à contaminação até o trecho inicial da terceira camada, entre 4 e 5 m de profundidade. A partir da profundidade 5 m não é possível identificar, por comparação direta com a sondagem de *background*, as zonas contaminadas, uma vez que os valores de referência são da mesma ordem de grandeza dos locais contaminados.

Os contrastes resistivos medidos na segunda camada indicam que a contaminação do solo e do fluído intersticial é elevada. No topo da terceira camada, entre 3,8 e 5 m de profundidade, a contaminação é elevada, pois os valores de resistividade nos ensaios RCPT-4, RCPT-4-5 e RCPT-5 são da mesma ordem de grandeza dos valores medidos no subsolo abaixo da vala de resíduo. Nesta região é

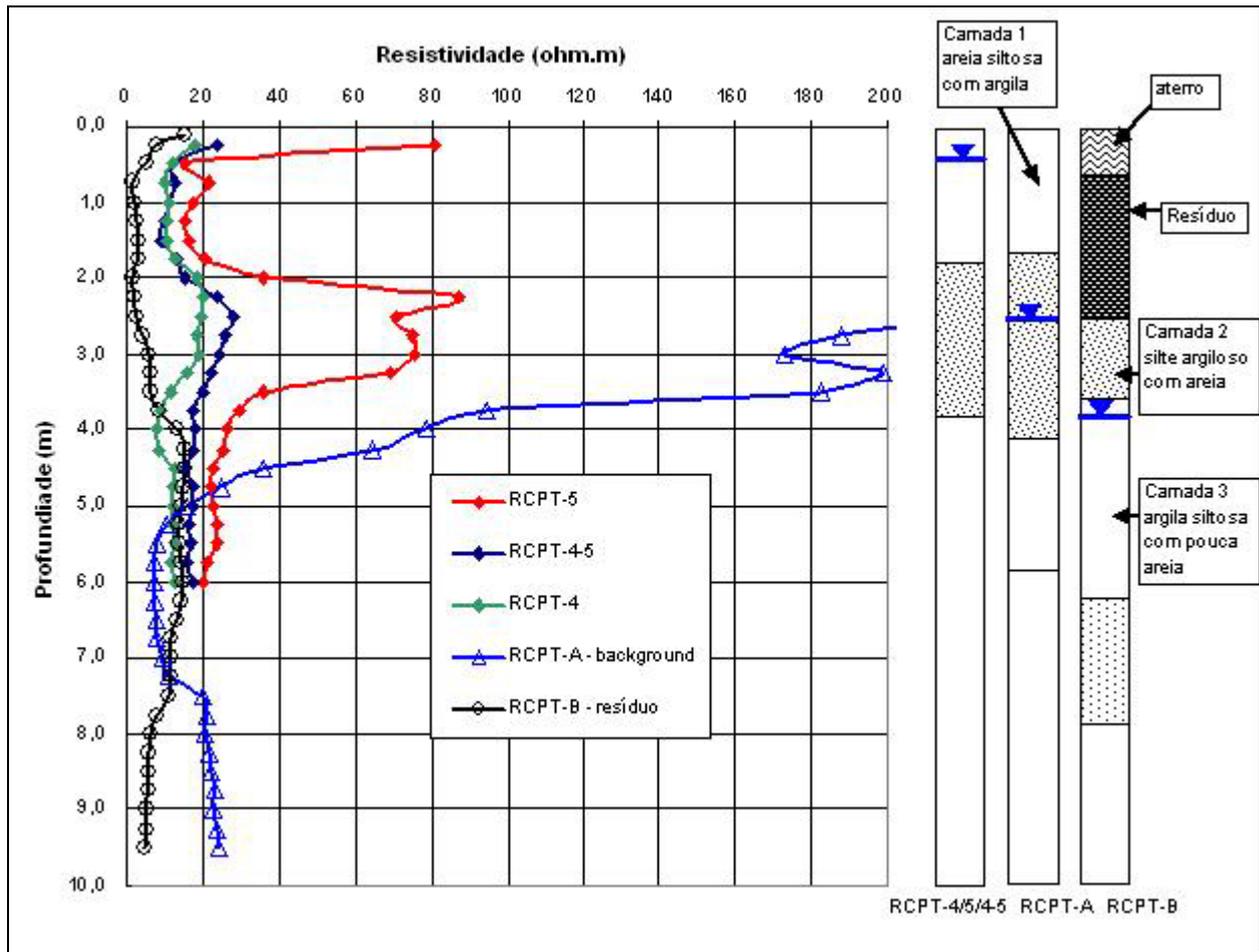


Figura 5 - Comparação dos ensaios de cone resistivo RCPT-4, RCPT-4-5, RCPT-5 e RCPT-B (resíduo) com o ensaio RCPT-A (background).

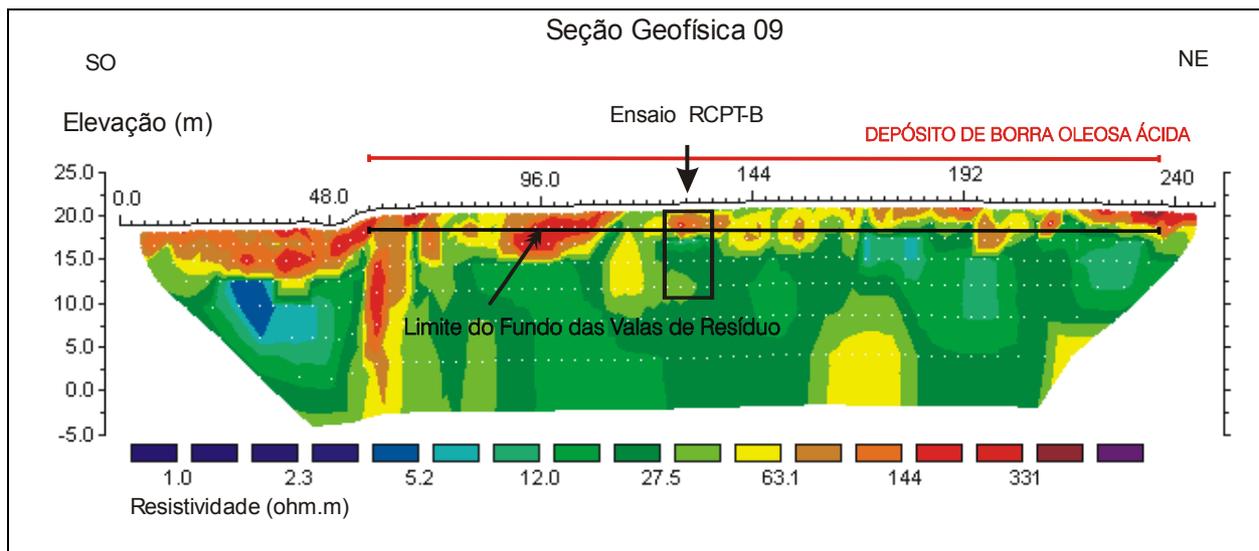


Figura 6 - Posição do ensaio RCPT-B sobre a seção geofísica 09.

possível que ocorra percolação dos contaminantes que são transportados ao local através da segunda camada, cujo teor de areia elevado induz a um fluxo predominantemente horizontal. Na primeira camada, a baixa umidade do solo no local do *background* constitui-se no principal fator que determina a elevação dos valores de resistividade. A condição não saturada do solo dificulta a comparação dos dados da zona contaminada com relação à área adotada como *background*.

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

A Figura 6 ilustra a posição do ensaio RCPT-B juntamente com a seção geofísica 09 (realizada sobre o depósito de resíduos). Na Tabela 2 constam os valores aproximados de resistividade das camadas obtidos pelas seções geofísicas 8 e 9 (realizadas em março/2003) e pelos ensaios de cone resistivo (realizados em setembro/2004). Tendo em vista a variação do nível d'água subterrâneo em cada momento, a comparação é feita nos ensaios realizados a jusante do depósito (área de banhado). Nesta região o nível d'água subterrâneo está próximo à superfície, sendo as variações ao longo do ano da ordem de 0,2 m. Na Tabela também são apresentados os valores de resistividade do resíduo medidos por cada técnica.

Tabela 2 - Comparação entre os resultados da geofísica de superfície e os ensaios de RCPT.

Ensaio RCPT	Camada	Ω RCPT (ohm.m)	Ω Geofísica (ohm.m)
RCPT-4	1	10	63-144
	2	7-20	144-237
	3	12	45-63
RCPT-4-5	1	10	63-144
	2	15-27	144-237
	3	17	12-45
RCPT-5	1	15-20	27-63
	2	30-90	45-144
	3	20-25	12-27
RCPT-B	resíduo	2,5	144

Os dados geofísicos são de um modo geral compatíveis com os resultados do cone resistivo na

terceira camada. Nas camadas superficiais, o método geofísico acusou elevados valores de resistividade, inclusive para as valas de resíduo. As diferenças entre os dados fornecidos pelos dois métodos podem ser devidas às seguintes hipóteses: (i) variações dos níveis de contaminação no subsolo durante o período entre os ensaios; (ii) tipo de configuração de eletrodos adotada nos ensaios de geofísica, bem como ao método de interpretação utilizado no tratamento dos dados de campo da geofísica.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de resistividade obtidos pelos ensaios de RCPT nas profundidades de amostragem da água subterrânea, conjuntamente com os valores de *background* das camadas do subsolo e os dados sobre a contaminação da água em cada ponto analisado.

Os dados fornecidos pelos ensaios de cone resistivo são consistentes com os resultados das análises químicas e físico-químicas na água subterrânea. Na área de banhado, onde foram realizados os ensaios RCPT-4 e RCPT-5 (ver Figura 1), o contraste resistivo na segunda camada é maior no local do ensaio RCPT-4, cujos níveis de contaminação são maiores do que no local do ensaio RCPT-5, onde os valores de resistividade são maiores (i.e., menor contraste resistivo).

Nos ensaios RCPT-2 e RCPT-3, a montante do depósito, os valores de resistividade da terceira camada, na zona de amostragem da água, são aproximadamente iguais, embora a contaminação da água subterrânea no local do ensaio RCPT-2 seja maior. O aumento do nível de contaminação da água subterrânea, do local do ensaio RCPT-3 para o local do ensaio RCPT-2 (ver Tabela 3), não reduziu a resistividade da terceira camada na mesma proporção. Acredita-se que, devido às maiores quantidades de argila nas porções inferiores da terceira camada, a resistividade do solo seja pouco alterada pela presença de contaminantes dissolvidos na água intersticial, até uma determinada concentração. É preciso que os níveis de contaminação na água sejam muito elevados para reduzir a resistividade da terceira camada a valores inferiores aos observados nos locais dos ensaios RCPT-2 e RCPT-3.

Observa-se que no ensaio RCPT-1 não é possível identificar a existência de contaminantes na terceira camada através da comparação com a vertical resistiva de *background*, na profundidade de amostragem da água subterrânea. Entretanto, as análises químicas revelam a presença de contaminação da água nesta região.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de RCPT e análises químicas e físico-químicas da água subterrânea.

Ensaio RCPT	Resistividade <i>background</i> RCPT (ohm.m)	Resistividade RCPT (ohm.m)	Profundidade amostragem da água subterrânea (m)	Resistividade da água subterrânea (ohm.m)*	pH**	Enxofre total (mg/L)
RCPT-1	8 (3)	15	7	10,05	3,8	23,5
RCPT-2	20 (3)	10	10	4,29	3,2	30
RCPT-3	20 (3)	10	10	26,74	4,6	12
RCPT-4	190 (2)	20	3	3,02	2,9	35,5
RCPT-5	190 (2)	75	3	5,09	3,5	27,3
(2) resistividade de <i>background</i> da camada 2						
(3) resistividade de <i>background</i> da camada 3						
* valor de <i>background</i> da resistividade elétrica da água subterrânea: 217 ohm.m						
** valor de <i>background</i> do pH da água subterrânea: 5,43						

CONCLUSÕES

Como síntese das informações obtidas neste trabalho de investigação geoambiental segue-se:

- O resíduo depositado na área possui resistividade elétrica muito baixa e o material lixiviado a partir deste reduz a resistividade do conjunto solo-fluído intersticial das camadas de solo da área.
- Os ensaios de cone resistivo indicaram a existência de uma região altamente contaminada na zona de oscilação do nível d'água subterrâneo no subsolo a montante do depósito. Esta região possui entre 2,5 e 3,0 m de espessura e produz contrastes resistivos elevados e da mesma ordem de grandeza dos valores registrados no subsolo abaixo das valas de resíduo, onde provavelmente os níveis de contaminação são elevados.
- O local de *background* forneceu valores de resistividade considerados adequados para a identificação de anomalias associadas à contaminação. Todavia, os valores de referência não possibilitaram a definição dos contrastes resistivos entre 5,0 e 7,5 m de profundidade, pois os valores de resistividade de *background* ficam abaixo dos valores observados nos locais contaminados. Acredita-se que a maior quantidade de argila contida no solo nesta região, com relação aos perfis contaminados, seja o principal fator responsável pelos valores inferiores de resistividade.
- Nas zonas profundas do subsolo, a contaminação produz contrastes resistivos menores do que nas zonas superficiais em razão das menores quantidades de contaminantes e também devido à maior quantidade de argila contida no maciço.
- A geofísica de superfície acusou valores elevados de resistividade para os resíduos depositados, que não foram verificados na sondagem de RCPT realizada na vala de resíduo. Nas zonas superficiais do subsolo (<5m), os valores de resistividade fornecidos pela geofísica foram maiores do que os dados obtidos pelos ensaios de RCPT. A compatibilidade entre os resultados produzidos pelas duas técnicas foi observada apenas a partir da profundidade de 6,0 m, na terceira camada.
- Os dados fornecidos pelo cone resistivo sobre a contaminação do subsolo são consistentes com os resultados das análises químicas e físico-químicas na água subterrânea. De um modo geral, a magnitude dos contrastes resistivos na zona de amostragem da água subterrânea é proporcional aos níveis de contaminação.

AGRADECIMENTOS

Aos senhores Diego Nacci e Fernando Mantaras pela grande ajuda na realização dos ensaios de cone resistivo. Aos revisores anônimos pelas pertinentes sugestões dadas ao trabalho inicial.

REFERÊNCIAS

- Benson, R.C. Remote Sensing and Geophysical Methods for Evaluation of Subsurface Conditions (1991). Pratical Handbook of Ground-Water Monitoring. Edited by David M. Nielsen, Lewis Publisher, Chelsea, Michigan, USA.
- Nacci, D.; Schnaid, F.; Almeida, M.; Coutinho, R. Q (2003). Perspectivas de Aplicação do Cone Resistivo, V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental RE-GEO, Porto Alegre, RS, Brasil, Vol. 1.
- Planigeo (2003). Levantamento Hidrogeológico e Avaliação da Contaminação na Área de Disposição de Resíduos Sólidos Industriais.

Geo-environmental Investigation of a Site Contaminated by Industrial Waste

ABSTRACT

The aim of this research is to present the results of a geo-environmental site investigation study accomplished on an old industrial landfill, through the combined use of direct (geological/geotechnical soundings and monitoring wells) and indirect methods (surface geophysics and resistivity cone penetration test - RCPT) of subsurface investigation. With the results of a surface geophysics survey (resistivity method) the contaminated subsoil zones have been identified and the groundwater monitoring network has been designed. A series of vertical resistivity cone tests have been carried out to evaluate the contamination depth in the perimeter of the landfill and the electric characteristic of the waste (acid oily sludge). It was found that the contaminant plume, formed from the deposit, reduces electrical resistivity properties of the subsoil layers. Resistivity profiles allowed identifying a highly contaminated region at depths up to 5 m which has been characterized by very low resistivity values. The results of RCPT tests have been compared with the geophysics surveys. Compatibility between the results was observed beginning at a depth of 5 m. The contamination levels of the groundwater, inferred from the RCPT results, were comparable with the chemical analysis data of the monitoring wells.

Keywords: Industrial Waste; Subsoil Contamination; Resistivity; Resistivity Cone.