

# Investigação de Intrusão de Água Salgada em Aquífero Superficial a Partir de Medidas de Resistividade Elétrica

## *Investigation of Salt-Water Intrusion in a Shallow Aquifer Based on Electrical Resistivity Measurements*

## Investigación de Intrusión de Agua Salada en Acuífero Superficial Mediante Medidas de Resistividad Eléctrica

Giuliano De Mio, Heraldo Luiz Giacheti, Rodoilton Stevanato, José Roberto de Góis, Francisco José Fonseca Ferreira

**Resumo.** Um programa de investigação do subsolo foi realizado com o objetivo de avaliar a extensão da contaminação com água salgada em um aquífero litorâneo sedimentar raso, a partir de medidas de resistividade elétrica. O local investigado situa-se próximo ao cais do porto de Paranaguá, litoral do estado do Paraná, Brasil, onde parte da água para uso industrial é obtida de poços rasos e diversos desses poços estão paralisados devido ao elevado teor de cloretos na água. O programa de investigação abrangeu a inspeção em campo, sondagens geofísicas pelo método de caminhamento elétrico dipolo-dipolo, ensaios com piezocone de resistividade, elaboração de perfil estratigráfico a partir dos poços e análises físico-químicas das águas. Os resultados dos ensaios com piezocone de resistividade indicaram grande potencial dessa técnica para essa finalidade. Ela fornece simultaneamente informações sobre a estratigrafia e as propriedades elétricas do perfil de solo, com elevado nível de detalhamento e complementam adequadamente os resultados do ensaio de caminhamento elétrico. A integração de todas as informações obtidas permitiu identificar as porções contaminadas, bem como orientar a locação de novos poços de abastecimento na área.

**Palavras-chave:** investigação do subsolo, resistividade, caminhamento elétrico, piezocone, contaminação, cloretos.

**Abstract.** A site investigation program was carried out to detect salt-water intrusions in a shallow sedimentary aquifer based on electrical resistivity measurements. The site is located close to Paranaguá harbor, in the Paraná State, Brasil. At this site, high chloride concentration contaminated shallow water wells used to supply water for local industries. The site investigation program included a fieldwork, dipole-dipole electrical profiling, resistivity piezocone tests, physical-chemical analysis of sampled water and interpretation of borehole logs. The resistivity piezocone tests provided two simultaneous information; the soil stratigraphy at a very detailed level and a quasi-continuous resistivity profile. Both information adequately complemented dipole-dipole electrical profiling test data. The integration of all test data allowed identifying the contaminated areas as well as guided the location of new water wells to be installed in this area.

**Key words:** site investigation, resistivity, piezocone, dipole-dipole electrical profiling, contamination, chloride.

**Resumen.** Se ha realizado un programa de investigación del subsuelo con objeto de evaluar la extensión de la contaminación con agua salada en un acuífero litoral sedimentar raso, mediante medidas de resistividad eléctrica. El local investigado se sitúa próximo al puerto de Paranaguá, litoral del estado de Paraná, Brasil, donde parte del agua para utilización industrial es obtenida de pozos rasos. Diversos de estos pozos se encuentran paralizados debido al elevado concentración de cloretos en el agua. El programa de investigación ha incluido inspección en campo, prospección geofísica por el método de perfiles eléctrico dipolo-dipolo, ensayos con piezocono de resistividad, construcción de perfil estratigráfico partiéndose de los pozos y análisis físico-químicas del agua. Los resultados de los ensayos con piezocono de resistividad han indicado grande potencial de dicha

Giuliano De Mio, M.Sc., Geólogo, Doutorando Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Golder Associates Brasil, Av. Barão Homem de Melo 4484, 3º andar, 30450-250 Belo Horizonte, MG, Brasil. e-mail: gdemio@golder.com.br.

Heraldo Luiz Giacheti, D.Sc., Eng. Civil, Prof. Adjunto, Faculdade de Engenharia, Unesp, 17033-360 Bauru, SP, Brasil. e-mail: giacheti@feb.unesp.br.

Rodoilton Stevanato, M.Sc., Geólogo, Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Jardim das Américas, 81531-980 Curitiba, PR, Brasil. e-mail: rodoilton@ufpr.br.

José Roberto de Góis, M.Sc., Geólogo, Geoplanejamento Ltda, Travessa Guarujá 44, Seminário, 80310202 Curitiba, PR, Brasil. e-mail: geoplanejamento@brturbo.com.br.

Francisco José Fonseca Ferreira, D.Sc., Geólogo, Prof. Adjunto e Chefe do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Jardim das Américas, 81531-980 Curitiba, PR, Brasil. e-mail: francisco.ferreira@ufpr.br.

Recebido em 17/9/2004; Aceitação final em 14/7/2005; Discussões até 28/4/2006.

técnica, que genera a la vez informaciones a respecto de la estratigrafía y las propiedades eléctricas del perfil del suelo con elevado nivel de detalle, completando adecuadamente los resultados del ensayo eléctrico. La integración de todas las informaciones obtenidas ha permitido identificar la extensión de la contaminación, además de orientar la ubicación de nuevos pozos de abastecimiento en la región.

**Palabras-clave:** investigación do subsuelo, resistividade, perfis eléctrico dipolo-dipolo, piezocono, contaminación, cloretos.

## 1. Introdução

O trabalho apresenta os resultados de um programa de investigação do subsolo conduzido com o objetivo de identificar a extensão da contaminação em aquífero litorâneo sedimentar raso. O local estudado situa-se próximo ao cais do porto de Paranaguá, estado do Paraná, Brasil, implantado sobre sedimentos quaternários da planície litorânea, caracterizados pela alternância de camadas argilosas e arenosas que recobrem rochas granito-gnássicas do embasamento cristalino.

A utilização da água dos poços tubulares rasos tem sido freqüente na região do porto, principalmente aquela destinada ao uso industrial. A perfuração indiscriminada de poços e o bombeamento excessivo resultaram na contaminação do aquífero pela intrusão de cunhas de água salgada, tornando-as salobra. Análises e monitoramentos em diversos poços indicaram que os teores de sal variam sensivelmente ao longo do ano, podendo esta variação estar vinculada à intensidade de bombeamento, aos níveis de precipitação pluviométrica e às variações das marés.

Foram programados ensaios com objetivo de identificar a extensão e nível das contaminações, bem como orientar a locação de novos poços. Estudos em imagens de satélite indicaram grandes lineamentos estruturais e orientaram a locação de linhas para ensaios geofísicos de caminhamento elétrico. Os resultados destes ensaios geofísicos de superfície levaram a identificação dos grandes contrastes de resistividade, porém não apresentaram resolução suficiente para identificar a estratigrafia da área. Para detalhamento do perfil estratigráfico foram realizados ensaios com piezocone de resistividade (RCPTU), locados sobre as linhas de caminhamento elétrico, e posicionados em função dos contrastes indicados nos resultados dos ensaios de geofísica de superfície. Os resultados dos ensaios de piezocone de resistividade forneceram, além do detalhamento da estratigrafia, o perfil de resistividade elétrica que complementou adequadamente as informações dos ensaios de caminhamento elétrico.

Os resultados desta pesquisa mostram que a integração das técnicas de investigação utilizadas produziu resultados interessantes, e o emprego do ensaio de piezocone de resistividade mostrou grande potencial para uma avaliação detalhada e simultânea dos perfis estratigráficos e de resistividade das camadas investigadas. O uso dos resultados dos ensaios de piezocone de resistividade é ainda pouco difundido no Brasil, porém algumas experiências internacionais como aquelas descritas por Campanella & Weemes, 1990; Campanella & Davies, 1997; Daniel *et al.* 1999; Strutynsky *et al.*, 1998 e 1999, indicam grande poten-

cial dessa técnica para alguns tipos específicos de terrenos. Regiões com geologia sedimentar recente, com pouco pedregulho e cascalho, nível d'água elevado e facilidade de acesso do equipamento, são as mais adequadas ao uso do ensaio de piezocone de resistividade. A adequabilidade de medidas de resistividade como parâmetro de controle está ligada às características elétricas de cada contaminante e ao seu contraste com o meio geológico circundante, sendo que diferentes concentrações de cloretos na água apresentam contraste significativo e excelente resposta aos ensaios elétricos.

## 2. A Resistividade como Ferramenta de Investigação do Subsolo

As heterogeneidades do solo podem apresentar contrastes de propriedades elétricas. Segundo Robinson & Corun (1988), duas propriedades elétricas importantes são a resistividade (ou condutividade) e a cargabilidade. A resistividade representa a dificuldade imposta pelo maciço de solo a passagem de uma corrente elétrica, expressa em ohm.m, e sua medida fornece informações sobre a constituição do solo e da água presente nos poros. A cargabilidade representa a capacidade de uma substância armazenar uma determinada voltagem residual, após a interrupção da corrente elétrica. Este fenômeno é conhecido como polarização induzida (*induced polarization - IP*).

A resistividade dos solos depende do valor da resistividade em cada ponto, da geometria elétrica do terreno e da disposição dos eletrodos. A resistividade em cada ponto do terreno é afetada principalmente pela constituição mineralógica dos grãos de solo, pelo grau de saturação e pela composição do fluido dos poros (Campanella & Weemes, 1990). A geometria elétrica do terreno depende em grande parte da estratigrafia e a disposição dos eletrodos depende do tipo de arranjo utilizado nos ensaios de campo, chamado de fator geométrico. A constante dielétrica é a principal propriedade que afeta a facilidade ou dificuldade com que as camadas de cátions adsorvidos no entorno das partículas de argila podem ser polarizadas. A orientação das partículas, o tamanho e a distribuição granulométrica, o grau de saturação, o tipo e a quantidade de eletrólito, a temperatura e o tratamento da superfície das partículas de argila, influenciam a resposta dielétrica e a resistividade.

A propagação da corrente elétrica nos solos ocorre principalmente através do fluido dos poros e da superfície das partículas argilosas (Archie, 1942). O fluido dos poros normalmente é mais condutivo que as partículas de argila e a condução é então controlada pela concentração eletrolítica. A condução pela superfície e a polarização da dupla

camada elétrica não podem ser completamente avaliadas em baixos teores de umidade. Desta forma, as medidas de resistividade estão intimamente ligadas ao teor de umidade do solo. A Fig. 1 mostra a grande influência que o teor de umidade exerce na resistividade, a qual decresce rapidamente com o aumento do teor de umidade. Neste caso, esta taxa de redução diminui consideravelmente em teores de umidade acima de 15-20%.

A interpretação dos resultados de ensaios de resistividade elétrica no solo é feita de forma mais criteriosa e precisa quando é conhecida a estratigrafia do perfil de solo. Estas informações podem ser obtidas a partir de sondagens com amostragens contínuas ou através da perfilagem indireta utilizando resultados de ensaios com o piezocone, ferramenta de investigação que foi utilizada nesta pesquisa.

A vasta experiência com o uso do piezocone como ferramenta para definição de perfil estratigráfico em nível de detalhe tem sido apresentada por diversos pesquisadores. Recentemente Amorosi & Marchi (1999) correlacionaram resultados de 234 ensaios de piezocone com 17 sondagens com amostragem integral e descrição criteriosa, na planície aluvial do Rio Pó, na Itália, e também concluíram que o piezocone tem elevado potencial para a avaliação e interpretação estratigráfica, desde que devidamente calibrado com amostragens contínuas do solo e com uso do conhecimento da história e dos ambientes geológicos.

A utilização dos resultados dos ensaios de piezocone de resistividade permite a obtenção de duas informações distintas e simultâneas, que são o perfil estratigráfico e a resistividade elétrica do meio. A geometria dos eletrodos é de fundamental importância na avaliação e entendimento dos resultados. Os piezocones de resistividade que pos-

suem dois eletrodos levam a problemas de polarização que podem interferir nos resultados (Strutinsky *et al.*, 1998). Já, os com quatro eletrodos, podem operar a baixas frequências sem o efeito da polarização. A ASTM (1982) sugere que a frequência de excitação da corrente elétrica situe-se na faixa de 25 a 3.000 Hz. Nos piezocones de resistividade, pequenas distâncias entre eletrodos permitem a detecção de camadas mais finas, porém a corrente elétrica circula na região de maior perturbação do solo devido a penetração do cone, o que interfere nas medidas de resistividade (Campanella & Weemees, 1990). Quando se aumenta o espaçamento dos eletrodos reduz-se o detalhamento da estratigrafia, porém os resultados da resistividade elétrica são mais coerentes com a condição do solo *in situ*, pois a corrente elétrica circula na região com menor perturbação do solo.

No piezocone de resistividade com quatro eletrodos, dispostos em arranjo Wenner, a corrente elétrica é aplicada nos dois eletrodos externos (denominados de corrente), e a diferença de potencial é lida nos dois eletrodos internos (denominados de potencial). Estas informações são úteis na identificação do perfil estratigráfico e posição do nível d'água, auxiliam na identificação de alguns tipos de contaminantes e podem fornecer informações sobre o nível de salinidade das águas subterrâneas. Caprona (2000) afirma que quando a salinidade e a composição mineral das camadas de areia são conhecidas, a resistividade pode fornecer boas indicações da porosidade relativa, isto é da densidade relativa das areias. Campanella & Weemees (1990) afirmam que os métodos de geofísica de superfície requerem entre 5 e 10% de contraste entre os meios para mapear uma pluma adequadamente, enquanto o uso do ensaio de piezocone de resistividade (RCPTU) pode identificar contrastes de resistividade de até 1%, fornecendo simultaneamente indicações sobre a mudança estratigráfica. Neste sentido, o uso combinado dos dois métodos de ensaio permite uma avaliação mais detalhada da contaminação, sendo a geofísica de superfície responsável por delimitar a extensão lateral de uma determinada contaminação e o ensaio com o piezocone de resistividade responsável por definir a estratigrafia e a posição mais precisa dos estratos efetivamente contaminados. Esse último tem sido empregado para as mais diversas aplicações, como na investigação de contaminação provocada por barragens de rejeitos (Campanella & Davies, 1997), identificação de intrusão de cunha salina em aquíferos (Strutinsky *et al.*, 1998; Campanella *et al.*, 1998), investigação de áreas com presença de contaminantes orgânicos, óleos pesados e creosoto (Campanella *et al.*, 1994), bem como na identificação de contaminação por hidrocarbonetos (Strutinsky *et al.*, 1999; Campanella & Weemees, 1990).

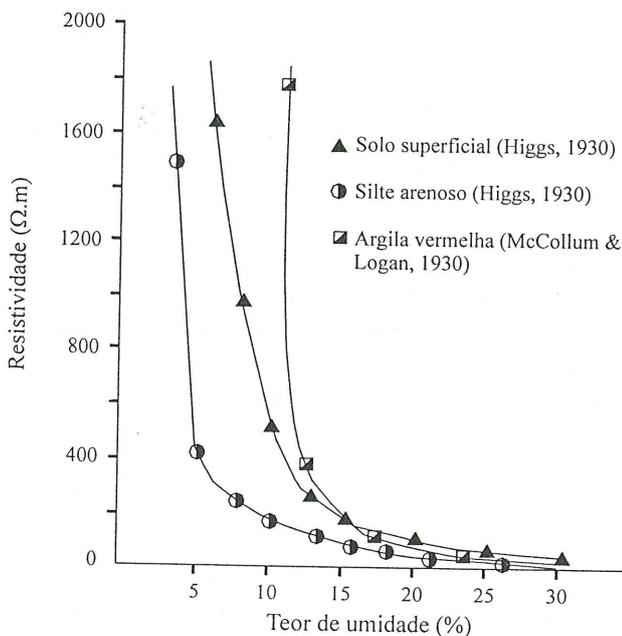


Figura 1 - Resistividade em função do teor de umidade do solo (McCarter, 1984, *apud* Strutinsky *et al.*, 1998).

### 3. Materiais e Métodos

Inicialmente, para avaliação preliminar da área em estudo foram utilizadas imagens de satélite (Landsat TM-

5), perfis litológicos dos poços de abastecimento e resultados de análises físico-químicas realizadas para controle e monitoramento da qualidade da água dos poços. O programa de investigação geoambiental realizado com a finalidade de avaliar a contaminação do aquífero com água salgada constou de ensaios geofísicos de caminhamento elétrico e ensaios com o piezocone de resistividade.

### 3.1. Caracterização da área

A área investigada situa-se na planície litorânea do estado do Paraná, no Brasil, na cidade de Paranaguá. Está distante aproximadamente 300 m de um braço de mar, junto ao Porto de Paranaguá. É uma região muito urbanizada com construções de médio e grande porte. A Fig. 2 mostra a localização da área e dos ensaios executados.

Geologicamente a área é constituída de sedimentos marinhos a transicionais, depositados durante pelo menos duas fases de transgressão/regressão (Massad, 1988). Caracteriza-se por intercalações de pacotes argilosos/siltosos e arenosos, com espessuras da ordem de 60 m, indicada pelo perfil de um poço profundo e pela interpretação do resultado de ensaios de caminhamento elétrico. Abaixo dos depósitos sedimentares ocorrem rochas cristalinas do embasamento, com um sistema de fraturas subverticais principais orientadas segundo N-S a N05W.

Este sistema foi identificado a partir de imagens de satélite e dos resultados dos ensaios de caminhamento elétrico. Na área em estudo ocorrem dois tipos de aquíferos: um mais superficial, do tipo sedimentar, com profundidades de 20 a 40 m; e outro mais profundo, do tipo fissural, alojado em fraturas nas rochas cristalinas, com profundidades de 70 a 100 m. Resultados de ensaios físico-químicos da água dos poços tubulares, indicaram contaminações por água salina tanto no aquífero superficial como no profundo, o que evidencia uma provável conectividade dos aquíferos por fraturamentos. Resultados das sondagens elétricas de superfície mostram anomalias de resistividade, que são indicativas de concentração salina nas águas, em certas porções do terreno.

### 3.2. Ensaios realizados

#### 3.2.1. Caminhamentos elétricos

Os ensaios de caminhamentos elétricos foram realizados utilizando o arranjo dipolo-dipolo, que consiste em injetar uma corrente elétrica no terreno através de eletrodos de corrente (AB), posicionados no início de cada linha de caminhamento, e realizar leituras das diferenças de potencial nos eletrodos homônimos (MN) dispostos em intervalos regulares ao longo de cada linha de investigação. Numa segunda etapa são deslocados os eletrodos de corrente e de potencial, repetindo-se o processo.

A Fig. 3 ilustra o procedimento de execução do ensaio (Fig. 3.a), os resultados pontuais obtidos (Fig. 3.b) e a

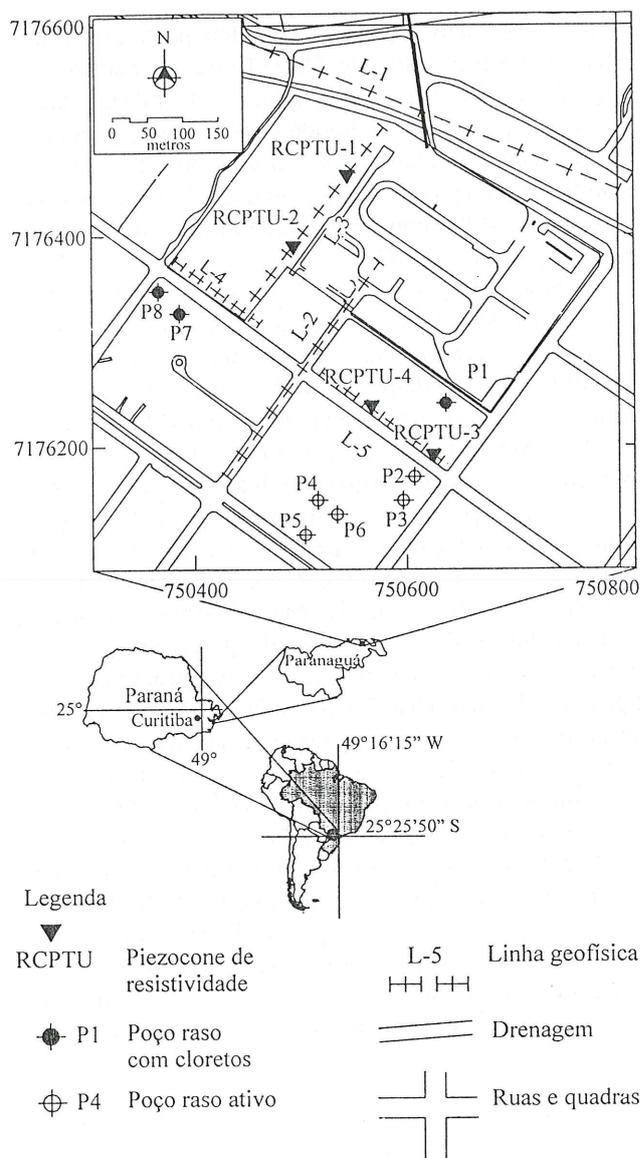


Figura 2 - Mapa com a localização da área e dos ensaios executados, indicando os poços ativos e aqueles paralisados por contaminação com cloretos.

construção de curvas de isovalores (Fig. 3.c), para facilitar a visualização da distribuição dos resultados.

Nos ensaios executados foram medidos os parâmetros resistividade aparente e cargabilidade aparente. A função resistividade aparente ( $\rho_a$ ) é dada pela seguinte expressão:

$$\rho_a = K * \Delta V/I$$

O fator K, que multiplica  $\Delta V/I$ , é puramente geométrico e depende apenas da disposição dos eletrodos A, B, M e N. A resistividade aparente ( $\rho_a$ ) não é um parâmetro físico do meio, mas um efeito integrado sobre um segmento do semi-espaço, para a qual contribuem:

- os valores da resistividade em cada ponto;

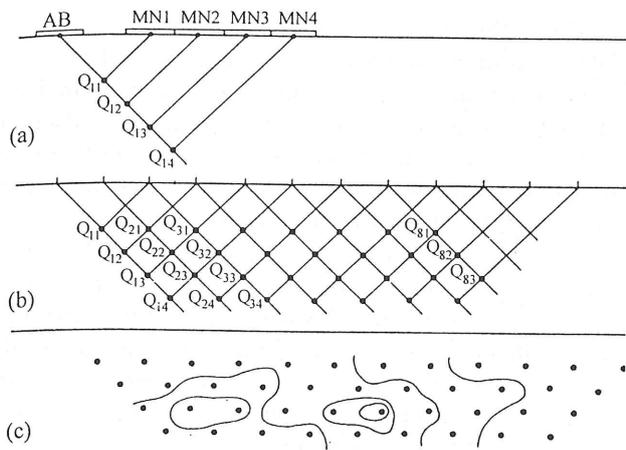


Figura 3 - Representação esquemática de uma pseudo-seção de resistividade, obtida a partir de um ensaio de caminhamento elétrico. (a) posicionamento dos eletrodos, (b) malha de resultados de medidas pontuais, (c) seção com curvas de isovalores.

- a geometria elétrica do terreno;
- a disposição geométrica dos eletrodos.

Quando uma corrente elétrica que circula no terreno é interrompida, a voltagem entre os eletrodos *M* e *N* não decai instantaneamente para zero. Durante o fluxo de corrente podem surgir concentrações de carga em várias partes do semi-espaco. Depois da interrupção da corrente, as cargas elétricas tendem a retornar à sua posição original, enquanto o voltímetro continua a indicar um sinal fraco. Durante alguns segundos, ou minutos, uma determinada fração da voltagem inicial permanece no terreno enquanto as concentrações de cargas são dissipadas. Este fenômeno é conhecido como polarização induzida (*induced polarization - IP*).

A constante dielétrica de uma substância é a medida da capacidade desta substância em armazenar carga quando um campo elétrico é aplicado.

Os resultados dos ensaios de caminhamento elétrico são apresentados na forma de seções, decorrentes da inversão automática dos dados de resistividade e cargabilidade aparentes, do que decorrem valores verdadeiros daquelas variáveis e profundidades reais.

Os ensaios de caminhamento elétrico foram realizados na área investigada utilizando equipamentos da *Iris Instruments*, pertencentes ao LPGA/UFPR, com os seguintes módulos: transmissor de alta potência VIP3000W, gerador Honda EM5000S e receptor multicanal e espectral ELREC 10. O processamento dos dados geofísicos foi realizado em ambiente computacional através de *software* especializados, como o pacote *Oasis Montaj™* e *Zonge 2D Inversion for Interactiv™ IP* da *Geosoft/Interpex*.

Foram realizados cinco linhas de caminhamento elétrico denominadas L-1, L-2, L-3, L-4 e L-5, cujo posicionamento é indicado na Fig. 2. A locação das linhas foi feita com base nos levantamentos estruturais e com base na posição dos poços já existentes no local. O comprimento da

linha (D) e espaçamento dos eletrodos de corrente e de potencial ( $AB = MN = e$ ) variaram, sendo L-1, com  $D = 550$  m,  $e = 50$  m; L-2, com  $D = 250$  m,  $e = 25$  m; L-3, com  $D = 225$  m,  $e = 25$  m; L-4, com  $D = 100$  m,  $e = 25$  m, e L-5, com  $D = 130$  m,  $e = 25$  m.

### 3.2.2. Piezocone de resistividade (RCPTU)

O piezocone de resistividade consiste em uma ponteira de aço instrumentada com sensores elétricos, que é cravada a velocidade constante de 2 cm/s, utilizando sistemas de reação apropriados. A ponteira avança verticalmente no solo, utilizando hastes com 1 m de comprimento, cravadas seqüencialmente. Os resultados são transmitidos a superfície por um sistema sônico, em intervalos de 4 cm, visualizados em tempo real na tela de um computador portátil e armazenados digitalmente para tratamento e interpretação. A ponteira é instrumentada com sensores de resistência de ponta ( $q_c$ ), atrito lateral ( $f_s$ ), poro-pressão ( $u$ ), inclinação ( $i$ ), temperatura ( $t$ ) e resistividade elétrica ( $R$ ). Os resultados de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$  são utilizados para estimativa de parâmetros geotécnicos e para classificação do tipo de solo quanto ao seu comportamento, utilizando correlações específicas. A Fig. 4 mostra uma foto e um desenho esquemático da geometria do piezocone de resistividade, com indicação da posição de cada um dos sensores. O sensor de resistividade elétrica é constituído por um módulo acoplado a parte posterior do piezocone padrão de 10 cm<sup>2</sup> de área de ponta, com geometria de 4 eletrodos, em arranjo tipo Wenner. A alimentação é feita por quatro baterias alcalinas no interior do módulo, com duração de aproximadamente 4 h de ensaio. O módulo de resistividade tem uma seção circular de 15 cm<sup>2</sup> e apresenta uma faixa de medição que varia de 0,3 a 2.000 ohm.m.

Uma descrição detalhada da forma de execução, calibração e interpretação de ensaios RCPTU é apresentada por Bolinelli *et al.* (2005).

## 4. Resultados

Foram realizadas cinco linhas de sondagens geofísicas pela técnica de caminhamento elétrico, arranjo dipolo-dipolo, 4 ensaios RCPTU e um levantamento das análises físico-químicas disponíveis das amostras de água coletadas nos poços de monitoramento existentes no local.

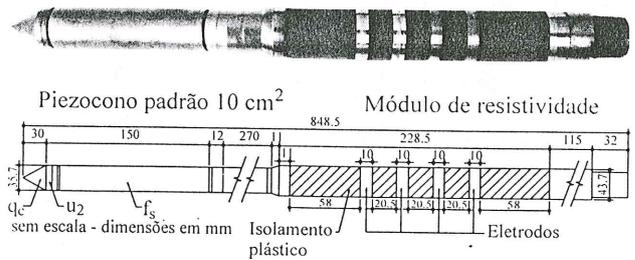


Figura 4 - Foto e desenho esquemático do piezocone de resistividade utilizado.

**4.1. Piezocone de resistividade (RCPTU)**

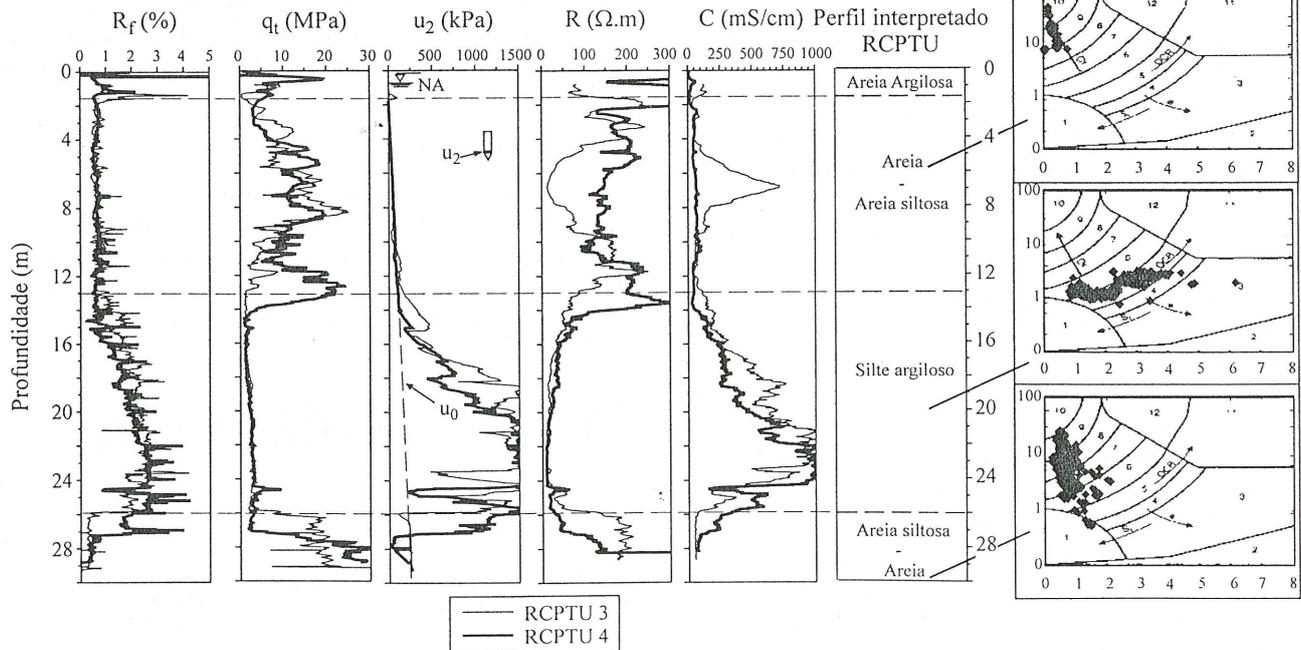
Os resultados dos ensaios com o piezocone de resistividade são apresentados na forma de gráficos com as leituras dos sensores contra a profundidade. Os ensaios avançaram até a capacidade de reação do penetrômetro e atingiram profundidades que variaram de 27 a 34 m medindo-se sempre a inclinação da ponteira para não danificar o aparelho e garantir que as medidas de  $q_c$  e  $f_s$  não fossem prejudicadas devido a uma inclinação elevada. Nos gráficos são apresentados os valores de resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ), a poro-pressão ( $u$ ), a resistividade ( $R$ ), a condutividade elétrica ( $C$ ), que é o inverso da resistividade, e a razão de atrito ( $R_f$ ), que representa a relação entre o atrito lateral local ( $f_s$ ) e a resistência de ponta ( $q_t$ ), indicativo da constituição granulométrica, quando se considera o comportamento dos materiais. Todas as constantes de calibração foram chegadas em laboratório antes da realização da campanha de ensaios de campo, e os valores da resistência de ponta foram corrigidos para o efeito das áreas desiguais. Os resultados dos ensaios RCPTU foram interpretados utilizando o ábaco proposto por Robertson *et al.* (1986) e por Fellenius & Eslami (2000), que classificam os solos a partir dos valores de atrito lateral e resistência de ponta, possibilitando assim fazer a identificação do perfil estratigráfico.

Na Fig. 5 apresenta-se o resultado de dois dos ensaios RCPTU realizados na área investigada. Nela tem-se a variação com a profundidade da resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ), da razão de atrito ( $R_f$ ), da poro-pressão ( $u$ ), da resis-

tividade ( $R$ ) e da condutividade elétrica ( $C$ ). A interpretação dos resultados dos 4 ensaios RCPTU realizados, indica um comportamento semelhante das unidades em toda a área investigada, a qual é caracterizada basicamente por uma camada arenosa superficial até 13 a 14 m de profundidade, seguida de camada argilosa até profundidades de 23 a 27 m, e novamente uma camada arenosa a partir desta profundidade, até o limite dos ensaios. A interpretação dos resultados dos ensaios RCPTU foi realizada segundo duas abordagens distintas. A primeira, com o objetivo de definir o perfil estratigráfico, utilizando os resultados da resistência de ponta, do atrito lateral local e da poro-pressão, identificando as transições entre as camadas a partir das variações observadas nos parâmetros e através do emprego do ábaco de classificação proposto por Robertson *et al.* (1986). A segunda, analisando os resultados do perfil de resistividade e confrontando-os com o perfil estratigráfico e com os valores de referência que constam na literatura.

**4.2. Caminhamentos elétricos**

Os resultados dos ensaios de caminhamentos elétricos são apresentados na forma de pseudo-seções e modelos de profundidade, obtidos por inversão. Para cada um dos perfis foi possível elaborar os modelos de resistividade e de cargabilidade. A Fig. 6 mostra o resultado interpretado do ensaio de caminhada elétrica realizado na linha L-5, que é representativa do comportamento da resistividade (Fig. 6.a) e da cargabilidade (Fig. 6.b) na área investigada.



**Figura 5** - Resultado dos ensaios com o piezocone de resistividade RCPTU-3 e RCPTU-4 interpretados para identificação do tipo de solo utilizando o ábaco de classificação proposto por Robertson *et al.* (1986).

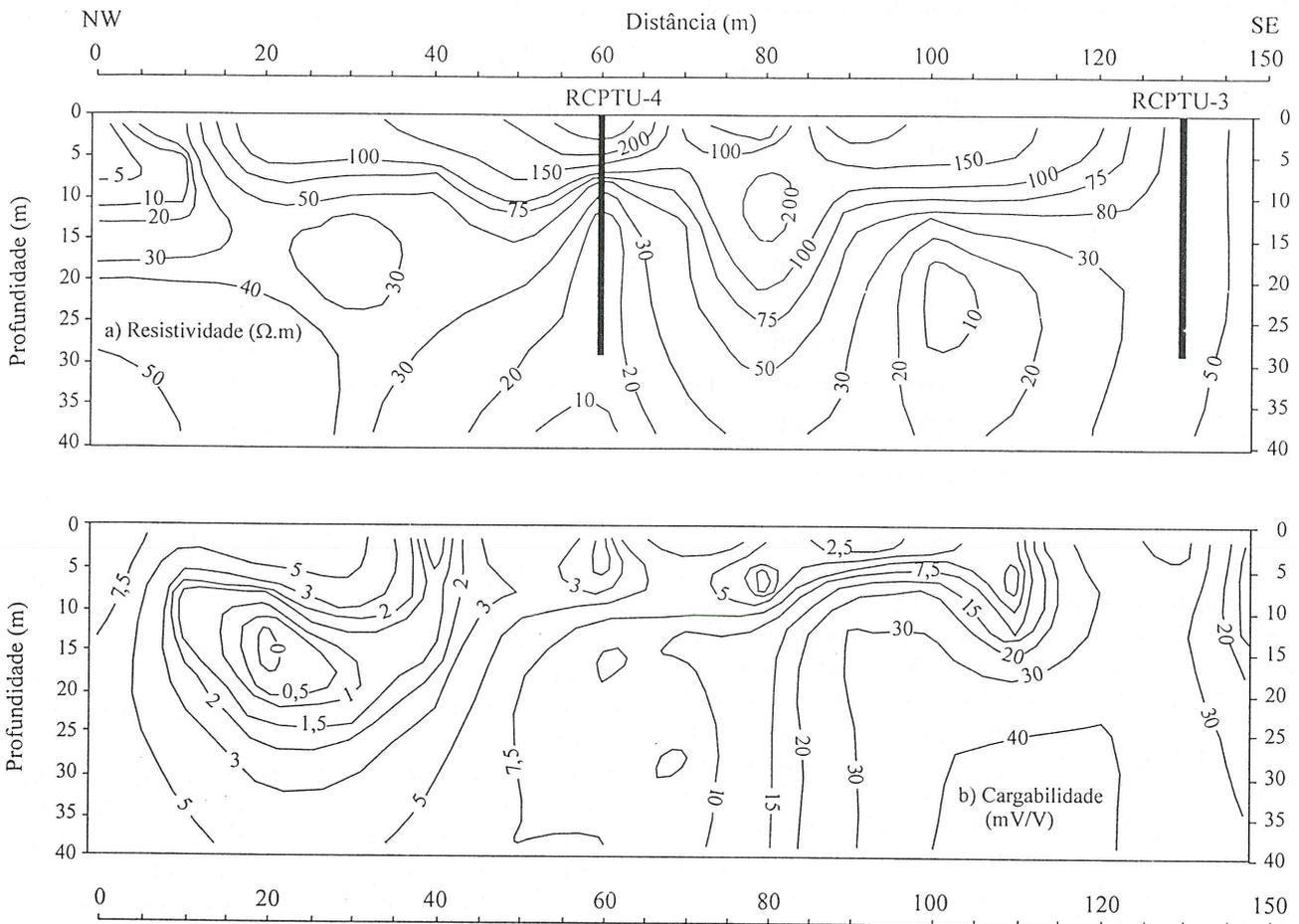


Figura 6 - Interpretação dos resultados dos ensaios de caminhamento elétrico na linha L-5 mostrando a posição do ensaio RCPTU-4, com indicação dos modelos de profundidade, obtidos por inversão, (a) da resistividade e (b) da cargabilidade.

### 4.3. Análises físico-químicas

Foram realizadas análises físico-químicas para controle e monitoramento da qualidade da água em diferentes épocas do ano e em diferentes poços existentes no local. A Tabela 1 mostra o resultado de algumas das análises realizadas, em três datas distintas, para cada um dos poços indicados.

### 5. Análise dos Resultados

A interpretação dos resultados dos ensaios foi feita com o objetivo de identificar os locais contaminados, bem como avaliar a distribuição estratigráfica dos sedimentos utilizando especialmente os resultados dos ensaios de piezocone de resistividade.

Os resultados dos ensaios de caminhamento elétrico forneceram uma indicação das variações da resistividade nos locais investigados. Estes ensaios, por suas características de execução, indicaram valores médios das diversas camadas investigadas, apresentando limitações no que diz respeito à identificação precisa dos contatos entre elas. As medidas da cargabilidade possibilitaram avaliar a capaci-

dade de polarização dos materiais geológicos. Através delas podem ser diferenciados materiais polarizáveis como a argila, de outros não polarizáveis, como a água. A avaliação conjunta dos modelos de resistividade e de cargabilidade permitiram distinguir solos argilosos daqueles vinculados à presença de água contaminada com sal.

Os resultados dos ensaios de piezocone de resistividade contribuíram substancialmente para o detalhamento da estratigrafia e da resistividade dos solos. A adequada interpretação do que foi constatado nessa área está intimamente ligada a integração das informações provenientes dos diversos ensaios e estudos realizados, principalmente aquelas oriundas do modelo e história geológica do local.

#### 5.1. Modelo geológico do terreno

O perfil geológico do local investigado é característico das regiões litorâneas brasileiras, com intercalações de camadas de material fino (argilas e siltes) e camadas de material grosseiro (areias e pedregulhos), refletindo a história de formação destes sedimentos, que está ligada aos ciclos de transgressão e regressão marinhas ocorridos durante o

**Tabela 1** - Teores de cloreto e condutividade elétrica da água coletada em diferentes poços e profundidades e em diferentes épocas.

Poço	Prof.	19/3/02		30/10/02	10/6/03	
		C	CL	CL	C	CL
1	20,00	1382,00	310,84	788,16		
2	20,00	144,80	28,25	35,20	314,00	44,67
3	20,00	149,90	21,19	37,28	194,30	20,64
4	21,00	296,00	49,45	79,92		
5	19,00	313,00	49,45	76,28	449,00	54,44
6	20,00	196,30	35,32	44,04	254,00	33,68
7	24,00	3900,00	1186,84	651,92	1961,00	306,97
8	18,00	1872,00	1208,03	312,88	2810,00	512,32

CL - Cloretos (mg/L), C - Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

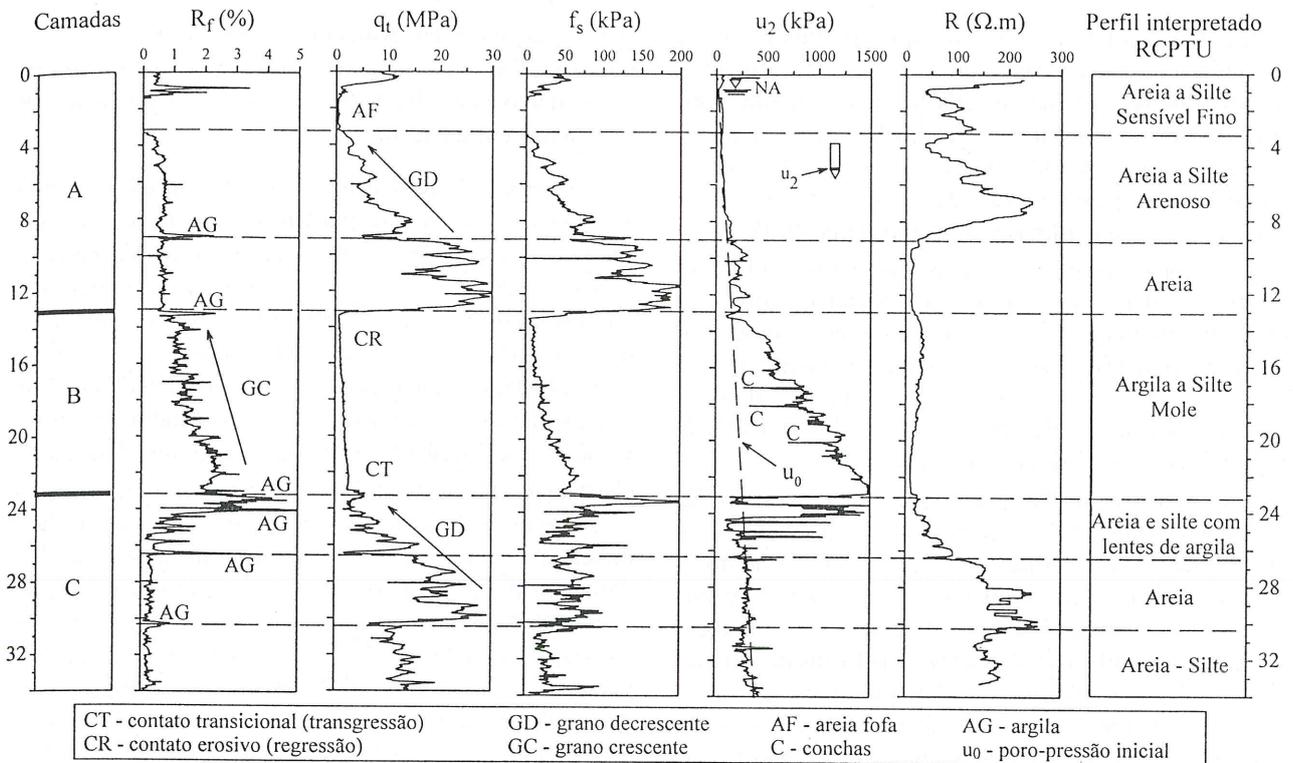
Terciário e o Quaternário (Massad *et al.*, 1996). Os trabalhos de Angulo & Suguio (1994) e Angulo & Lessa (1996) mostram que a deposição dos sedimentos, bem como a conformação dos diversos ambientes sedimentares está associada às flutuações do nível médio dos mares, ocorridas principalmente durante os últimos 200.000 anos. Os perfis dos ensaios RCPTU indicam claramente estas alternâncias de materiais, além disto os resultados dos ensaios de caminhamento elétrico indicam um contexto geológico mais complexo, inclusive com um provável fraturamento vertical, que pode estar controlando a migração da água salgada, identificada também em um poço profundo (150 m), com entradas d'água em fraturas das rochas cristalinas.

## 5.2. Detalhamento do perfil estratigráfico

Tendo como base o modelo geológico do terreno, a investigação detalhada do subsolo deve conduzir à identificação do perfil estratigráfico, com base na interpretação dos valores de resistividade, a qual pode identificar regiões da área em estudo onde ocorrem diferentes concentrações salinas. Os resultados dos ensaios com o piezocone de resistividade contribuíram neste sentido, pois forneceram estas duas informações simultaneamente, obtidas por diferentes sensores.

O perfil estratigráfico da área foi interpretado detalhadamente com base nos resultados dos ensaios RCPTU-1, 2, 3 e 4. O resultado do ensaio RCPTU-1, apresentado na Fig. 7, por ser o que atingiu maior profundidade e por ser semelhante aos demais, é discutido com detalhes para a descrição dos estratos. Assim, de uma maneira geral, o perfil pode ser compartimentado em três principais pacotes, sendo o A de 0,0 a 13,0 m, arenoso; o B de 13,0 a 23,0 m, argilo-siltoso; e o C de 23,0 a 34,0, também arenoso. Cada uma destas camadas de sedimento é descrita pelo grau de homogeneidade, tipo de contato, composição granulométrica (através da  $R_f$ ), resistência (através de  $q_c$  e  $f_c$ ) e permeabilidade (através de  $u$ ).

Na camada inferior (C) predominam areias com resistência de ponta entre 5 e 25 MPa. Os principais indicadores que permitem esta classificação são a razão de atrito baixa ( $R_f$  entre 0,5 e 1 %) e a ausência de excesso de poro-pressão ( $\Delta u = u_2 - u_0$ ). Nas porções mais superiores desta camada, entre 23 e 25 m, ocorrem intercalações de camadas argilo-siltosas. Estas intercalações são indicativas do início da transgressão marinha e representam prováveis ambientes lagunares formados em picos de invasão marinha, durante a fase transgressiva. No interior deste pacote arenoso, podem ser identificadas duas interfaces, uma a 26 e outra a 30 m de profundidade, que podem ser indicativas de flutuações do nível médio marinho (nmm), em um mesmo ambiente, porém com intensidade de energia distinta. Como a razão de atrito ( $R_f$ ) é praticamente constante e observam-se variações nos valores da resistência de ponta e do atrito local, considera-se que a camada de areia, entre 30 a 34 m, tem granulometria mais fina que a camada de areia, entre 23 a 30 m. Nesta última camada a granulometria é grano-decrescente em direção ao topo, com transição gradual para o pacote B, tipicamente de constituição argilo-siltosa. Na camada intermediária (B), predominam solos finos com resistência de ponta variável entre 1 e 3 MPa. Os principais indicadores que possibilitam identificar essa camada são valores das resistências de ponta e dos atritos laterais baixos, com  $R_f$  variável de 1 a 2,5% e forte geração de excesso de poro-pressão durante a cravação do piezocone. A poro-pressão e a razão de atrito crescentes em direção a base, podem ser indicativos de que o teor de argila é mais elevado nas porções inferiores da camada, com alguma contribuição da tensão vertical efetiva. A constituição granulométrica e o grau de homogeneidade indicam ambiente tranquilo de deposição, provavelmente em baías fechadas, com pouca interferência de tempestades. Nas profundidades de 17, 18 e 20 m ocorrem quedas abruptas da poro-pressão, com pouco ou nenhum reflexo nos demais sensores. Amorosi & Marchi (1999) identificaram



**Figura 7** - Resultado de ensaio de piezocone de resistividade RCPTU-1 com interpretação para definição de perfil estratigráfico utilizando o ábaco de classificação de Fellenius & Eslami (2000).

feições semelhantes como sendo níveis com ocorrência de conchas. A transição para o pacote A é abrupta, de caráter erosivo e marcada fortemente pelos valores de  $q_t$ ,  $f_s$  e  $u$ . Picos de 3 a 6 % na razão de atrito ( $R_f$ ) podem indicar camadas francamente argilosas, formadas em ambientes lagunares de transição.

Na porção superior (A), entre 0 e 13 m de profundidade, predominam solos arenosos. Observa-se um caráter granodécrescente em direção ao topo. No trecho de 1 a 3 m ocorre material de resistência muito baixa, provavelmente areia fofa de dunas ou praias, devido ao baixo  $R_f$ , penetração drenada ( $\Delta u = 0$ ) e  $q_t$  muito baixo.

### 5.3. Contaminação

No local investigado, a presença de poços de abastecimento que originalmente apresentavam água potável e que atualmente estão contaminados com água salobra, é o principal indício de que ocorrem intrusões de plumas com teores elevados de NaCl no aquífero superficial, estendendo-se inclusive para o aquífero de fissura do embasamento cristalino. Considerando que o modelo de fluxo preferencial é no sentido do continente (água doce) para o mar (água salgada), presume-se que a perfuração e o bombeamento dos poços teve influência marcante no desenvolvimento dessas plumas, com interferências das condições climáticas e das movimentações de maré. Contrastes marcantes de resistividade podem ser verificados, tanto nos

perfis obtidos dos ensaios de caminhamento elétrico, como nas perfilagens com os ensaios RCPTU.

A resistividade modelada da linha de caminhamento elétrico L-2 (Fig. 6.a), indica uma interface na profundidade de 20 m, separando terrenos mais resistivos, em superfície, de terrenos mais condutivos, em profundidade. Esta interface deve representar o contato água doce/água salobra. No extremo NE da L-2 esta interface mais condutora tende a aflorar, sendo esta interpretação corroborada pela existência de vários poços contaminados e desativados (P-7 e P-8). Na linha L-4 a porção mais resistiva está na faixa de 10 a 15 m, diminuindo sua profundidade no sentido SE. Na linha L-5 (Fig. 6.b) esta superfície resistiva também se encontra a profundidades entre 10 e 15 m, tendendo a superfície nas extremidades NW e SE da linha.

Na posição 80 m da linha L-5 esta interface tem aprofundamento abrupto, sugerindo um controle por fraturamentos. As medidas tomadas nas linhas L-4 e L-5 foram realizadas aproximadamente dois meses após o levantamento realizado nas linhas L-1, L-2 e L-3. Existe uma diferença de profundidade da interface resistiva entre as duas campanhas, o que pode ser indicativo de um processo dinâmico, onde os teores de sal podem variar em função do bombeamento dos poços, das condições climáticas e das variações das marés.

Na Fig. 8 tem-se a interpretação dos 4 ensaios RCPTU realizados com o objetivo de identificar o perfil estratigráfico e a intrusão de água salgada. Na posição do

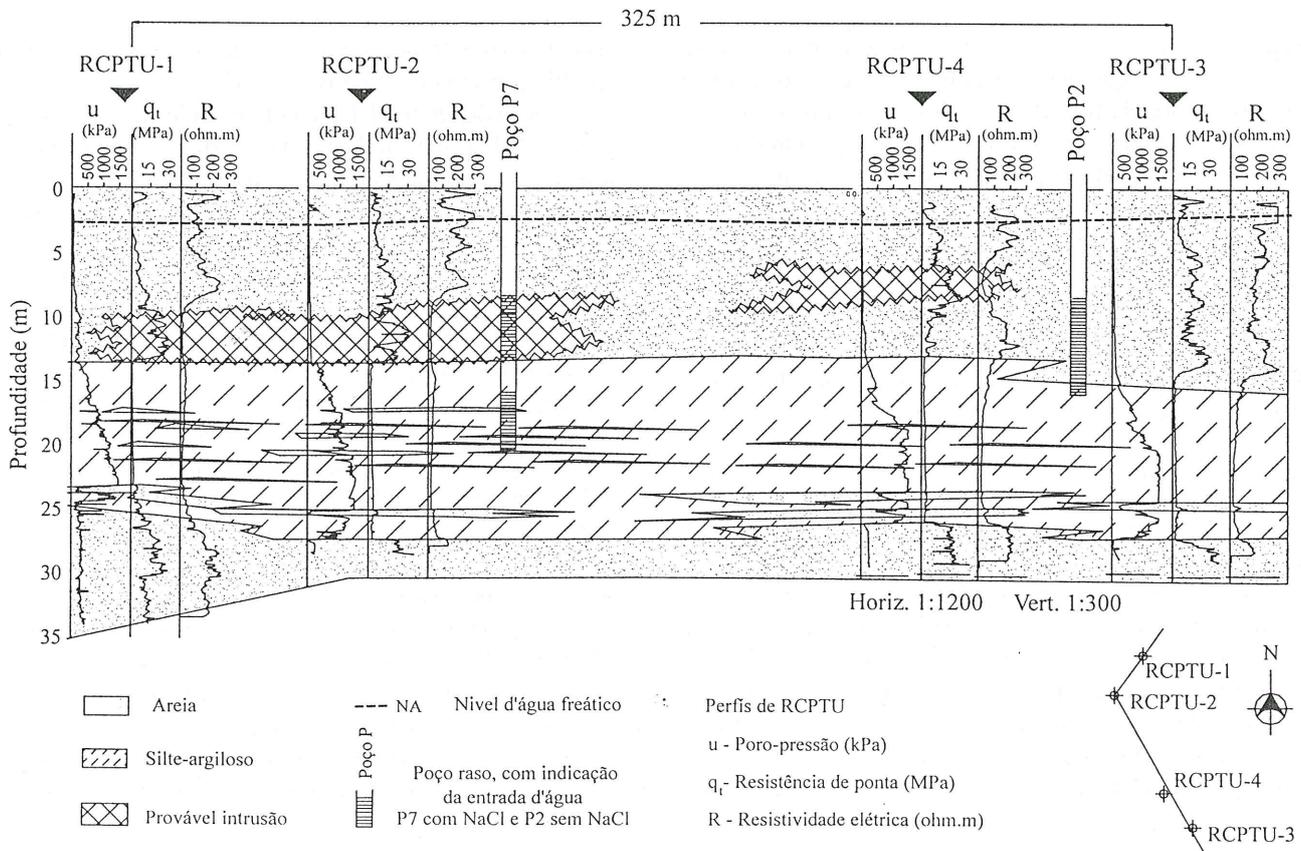
RCPTU-1, o trecho entre 9 e 13 m de profundidade, de constituição arenosa, resistividade de 12 a 16 ohm.m, é indicativo de região contaminada por água salobra. Uma camada de areia semelhante, no trecho de 25 a 37 m, mostra valores de resistividade mais elevados, de 200 a 250 ohm.m, os quais são valores típicos para água doce, conforme descrito por Davies & Campanella (1995).

A comparação entre os valores da resistividade, derivados das sondagens com piezocone, com aqueles obtidos a partir do caminhamento elétrico, apresentam ordem de grandeza compatível, com resultados variando de 2 a 200 ohm.m. As diferenças observadas entre os valores se devem ao caráter de maior detalhe nos ensaios RCPTU e às variações das plumas de contaminação.

A identificação da estratigrafia a partir dos resultados dos ensaios RCPTU indica que a distribuição das camadas de areia e argila/silte é relativamente homogênea, sem mudanças sensíveis na profundidade das camadas entre os ensaios realizados. A Fig. 8 mostra uma seção geológica com indicação dos prováveis locais de intrusão de água salina no aquífero, que é responsável pela restrição ao uso de diversos poços de abastecimento. Os resultados dos ensaios de caminhamento elétrico mostraram contrastes de resistividade, com bolsões resistivos (100-200 ohm.m) em meio a porções condutivas. Estes

bolsões devem estar associados a concentrações de água doce. Na linha L-5 (Fig. 6.a) observa-se claramente um afloramento superficial das porções com baixa resistividade no sentido nordeste.

Campanella & Weemes (1990), em ensaios realizados no campo experimental *Mac Donald Farm*, em depósitos arenosos glacio-marinhos da região de Vancouver - Canadá, indicam que valores de resistividade abaixo de 50 ohm.m correspondem a sólidos dissolvidos totais acima de 500 mg/L, e valores de resistividade de 0,5 ohm.m correspondem as águas salgadas. No ensaio RCPTU-2, na camada arenosa, entre 9 e 14 m de profundidade, têm-se valores de resistividade de até 3,3 ohm.m (condutividades elétricas de até 3.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), interpretado como região com presença de água salgada. Strutinski *et al.* (1999), indicaram que concentrações máximas na água potável de 250 ppm de cloretos, devem corresponder a valores de resistividade entre 5 a 5,5 ohm.m. Os resultados das análises químicas realizadas nas amostras de água coletada dos poços indicaram teores variados de concentração salina nos diversos poços em diferentes épocas, conforme mostram os dados apresentados na Tabela 1. Esses resultados também indicam que ocorrem variações destes teores ao longo do ano.



**Figura 8** - Interpretação de perfil estratigráfico, com base nos ensaios de piezocone de resistividade e indicação dos prováveis locais onde ocorre contaminação por água salgada no aquífero superficial.

#### 5.4. Os ensaios RCPTU na investigação da área estudada

O programa de investigação geoambiental realizado no local iniciou-se com a análise de imagens de satélite e resultados de análises físico-químicas de amostras de água coletadas de poços existentes na área e ensaios de caminhamentos elétricos. Ensaios com o piezocone de resistividade (RCPTU) foram executados em seguida, a fim de detalhar o perfil estratigráfico e identificar os pontos com presença de elevados teores de NaCl no aquífero superficial. A combinação entre estas diferentes técnicas de investigação ainda não é prática corrente no Brasil.

A escolha de locais para realização de ensaios RCPTU foi feita após a interpretação dos resultados dos ensaios de caminhamentos elétricos e assim foi possível realizar ensaios que interceptariam regiões contaminadas do maciço (por exemplo, o RCPTU-4 na Fig. 6) e ensaios que não interceptariam essas regiões (RCPTU-3 na Fig. 6), esse último pode ser útil como indicativo de perfil de resistividade de controle (*background*) para o local investigado. Esta é uma prática recomendável e possível de ser adotada na investigação de áreas contaminadas e a interpretação de resultados de sondagens de caminhamento elétrico foram muito úteis para esse fim.

Uma limitação da campanha de ensaios RCPTU realizada no local, devido a problemas de tempo e de custo, é que não foram feitas amostragens de água em regiões do maciço que apresentavam baixa resistividade. Isso poderia ser realizado utilizando amostradores da tecnologia *direct-push* (Robertson *et al.*, 1996) que são fáceis de serem cravados no solo utilizando o próprio sistema de cravação do piezocone e possibilitam a coleta de água em pontos discretos do perfil no mesmo momento da realização dos ensaios RCPTU. A amostragem de água e os resultados dos ensaios RCPTU permitiriam estabelecer uma correlação direta entre a resistividade medida no ensaio e a resistividade ou mesmo a concentração de cloretos presente nas amostras de água coletadas, para o local específico, o que seria muito interessante. Recomenda-se empregar esse procedimento em campanhas de investigação com esse objetivo para que se possam estabelecer correlações específicas para cada local investigado.

Apesar dos poucos ensaios RCPTU ainda realizados no Brasil e pela impossibilidade, nessa campanha, de coletar amostras de água utilizando amostradores especiais, os resultados desses ensaios foram extremamente úteis no detalhamento do perfil estratigráfico e na identificação de pontos onde ocorrem intrusões de água salina no aquífero, o que demonstra o potencial dessa ferramenta para investigação da contaminação de sais em aquífero sedimentar, também em nosso país.

#### 6. Conclusões

A partir do programa de investigação geoambiental realizado, foi possível identificar o perfil estratigráfico com

detalhe e as regiões com maior concentração de sal nas águas subterrâneas. A utilização do método de caminhamento elétrico permitiu uma visualização abrangente da distribuição das resistividades, porém apresentou limitações relativas à identificação precisa dos limites entre as camadas investigadas, e, por isso, foi complementada por uma técnica de ensaio invasivo, ou seja, por ensaios com o piezocone de resistividade.

A identificação precisa da pluma de contaminação é complexa especialmente nesse local. A distribuição subsuperficial das porções mais resistivas (água doce) e dos segmentos mais condutivos (água salobra) é muito heterogênea, indicando forte interferência do processo de bombeamento e provável contribuição da precipitação pluviométrica e das variações das marés. Desta forma a indicação das porções contaminadas, mostradas na Fig. 8, é uma interpretação possível, com base nos resultados das quatro sondagens RCPTU realizadas no local e indicam que não existe continuidade entre os bolsões com concentração de água salgada.

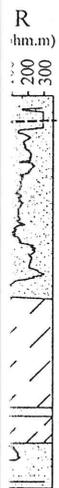
A faixa de variação dos valores de resistividade derivada dos caminhamentos elétricos e dos ensaios RCPTU é da mesma ordem de grandeza, indicando coerência entre os resultados de ambas as técnicas. O ensaio de piezocone de resistividade tem sua aplicação mais indicada para estudos de detalhe, enquanto que o ensaio de caminhamento elétrico é indicado para áreas maiores, fornecendo valores médios de resistividade e possibilitando assim identificar regiões do maciço mais apropriadas para realização de sondagens invasivas. A integração dos resultados dos dois tipos de ensaio se mostrou apropriada na identificação dos locais com contaminação em aquíferos litorâneos rasos. A coleta de amostras dos sedimentos e água, apesar de complementares, são indispensáveis para um perfeito entendimento do problema. O emprego de amostradores da tecnologia *direct-push*, que podem ser cravados utilizando o mesmo sistema de reação empregado em ensaios RCPTU, são ferramentas interessantes para esse fim e são recomendadas para investigação em áreas com as características presentes no problema estudado.

Os resultados apresentados demonstraram as vantagens do emprego do piezocone de resistividade para orientar a locação de poços tubulares rasos, especialmente em áreas onde ocorrem sedimentos arenosos sujeitos a contaminação por água salgada. Finalmente, o contraste de resistividade é indicativo da presença de contaminação salina em aquíferos costeiros.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento que possibilitou a aquisição do piezocone de resistividade utilizado. Agradecem também a Cooperativa *Coamo* pelo fornecimento dos resultados das análises físi-

água  
e um  
sisti-  
  
reali-  
lepó-  
ver -  
o de  
cima  
m.m  
2, na  
m-se  
lades  
gição  
(999),  
el de  
es de  
aná-  
a dos  
a nos  
m os  
bém  
o do



-4

PTU-3

locais

, 2005.

co-químicas de amostras de água dos poços e pela liberação da área para realização dessa pesquisa.

## Referências

- Amorosi, A. & Marchi, N. (1999) High-resolution sequence stratigraphy from piezocone tests: an example from the Late Quaternary deposits of the southeastern Po Plain. *Sedimentary Geology*, v. 128, p. 67-81.
- Angulo, R.J. & Suguio, K. (1994) Problems in the interpretation of quaternary beach ridges: The Example from the Coastal Plain of Paraná (Brasil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 66:3, p. 347-358.
- Angulo, R.J. & Lessa, G. (1996) The Brazilian sea level curves: A critical review with emphasis on the curves from Paranaguá and Cananéia regions. *Anais do XXXIX Cong. Bras. Geologia*, p. 285-288.
- Archie, G.E. (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, v. 146, p. 54-62.
- ASTM (1982) D 1125-82 Standard test Method for Electrical Conductivity and Resistivity of Water. Section 11.01, Water, p. 149-156.
- Bolinelli, H.L.; Mondelli, G.; De Mío, G.; Peixoto, A.S.P. & Giacheti, H.L. (2005) Piezocone de resistividade na investigação do subsolo: Execução, interpretação e exemplos de aplicação. *Anais do 11º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia Ambiental*, Florianópolis, SC, p. 15, CD-Rom.
- Campanella R.G. & Davies M.P. (1997) *In-situ* testing for geo-environmental site characterization: A mine tailings example. *Proc. of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburgo, v. 1, p. 43-46.
- Campanella, R.G. & Weemee, I. (1990) Development and use of an electrical resistivity cone for ground water contamination studies. *Can. Geotech. J.*, v. 27, p. 557-567.
- Campanella, R.G.; Davies, M.P.; Boyd, T.J. & Everard, J.L. (1994) *In-situ* testing methods for groundwater contamination studies. *Proc. of the Symposium on Developments in Geotechnical Engineering*, From Harvard to New Delhi, 1936-1994, Balkema, p. 371-382.
- Campanella, R.G.; Davies, M.P.; Kristiansen, H. & Daniel, C. (1998) Site characterization of soil deposits using recent advances in piezocone technology. *Proc. of the 1st Int. Conference on Site Characterization - ISC'98*, Atlanta, p. 995-1000.
- Caprona, G. (2000) Comunicação pessoal, Geotech AB, Suécia.
- Daniel, C.R.; Giacheti, H.L.; Howie, J.A. & Campanella, R.G. (1999) Resistivity piezocone (RCPTU) data interpretation and potential applications. *Proc. of the XI Pan. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng.*, Foz do Iguaçu, v. 1, p. 361-368.
- Davies, M.P. & Campanella, R.G. (1995) Piezocone technology: Downhole geophysics for the geo-environmental characterization of soil. *Proceedings of Symposium on App. of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Orlando, 11 p.
- Fellenius, B.H. & Eslami, A. (2000) Soil profile interpreted from CPTU data. *Year 2000 geotechnics. Proc. of the Geotechnical Engineering Conference*, Asian Institute of Technology, Bangkok, 18 p.
- Massad, F. (1988) História geológica e propriedades dos solos das baixadas - Comparação entre diferentes locais da costa brasileira. *Anais do Simp. Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras: Origem, Características Geotécnicas e Experiências de Obras*, Rio de Janeiro, p. 3.1-3.34.
- Massad, F.; Suguio, K. & Perez, F.S. (1996) Propriedades geotécnicas de sedimentos argilosos como evidência das variações do nível relativo do mar em Santos. *Proc. 8º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia*, São Paulo, v. 1, p. 163-176.
- Robertson, P.K.; Campanella, R.G.; Gillespie, D. & Greig, J. (1986) Use of piezometer cone data. *Proc. of the In-Situ-86, ASCE Specialty Conference*, Blacksburg, p. 1263-1280.
- Robertson, P.K.; Lunne, T. & Powell, J. (1996) Application of Penetration Tests for Geo-Environmental Purposes. *Advances in Site Investigation Practice*. Thomas Telford, London, p. 407-419.
- Robinson, E. & Corun, C. (1988) *Basic Exploration Geophysics*. John Wiley & Sons, New York, 562 p.
- Strutynsky, A.I.; Glaccum, R.A.; Conklin, L.C. & Baker, B. (1998) Chloride mapping using geophysical and cone penetrometer methods. *Proc. of the 1st Int. Conference on Site Characterization - ISC'98*, Atlanta, v. 1, p. 663-668.
- Strutynsky, A.; Gilmer, K.; Osborne, C.; Romp, J. & Darr, R. (1999) Municipal groundwater drinking supply protection using cone penetrometer exploration methods. Ohio, EPA, internal paper.