

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

**ESTUDO GEOFÍSICO EM SEDIMENTOS CONTAMINADOS POR  
ETANOL (ÁLCOOL COMBUSTÍVEL) EM ESCALA DE LABORATÓRIO**

Leonardo Zani Castello

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP – Campus de Rio Claro, para obtenção do título de Mestre em Geociências, área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro – SP

2010

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me dar vida, saúde, e possibilidade de buscar a realização dos meus sonhos.

A minha amada mãe, que com seu exemplo de luta e demonstração continua e incondicional de amor para comigo, me arrastou nos momentos difíceis, mesmo que a distância, e sem muitas palavras. Meu amor pela senhora é eterno.

Ao meu amado pai, Eduardo Castello, que com seu jeito quieto e sereno, de poucas palavras e de muitas atitudes, é meu maior exemplo de honestidade, dignidade e trabalho.

A toda minha família, sobretudo aos meus avós maternos Geraldo Zani e Cleyde MacAlpine Zani, e avós paternos Carlos Castello e Odete Fontolan Castello. Somente sobre seus ombros fortes e cansados pelo trabalho é que posso enxergar mais longe.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Celso de Oliveira Braga, por todos os momentos de aprendizado que me proporcionou, pela orientação prestimosa em todas as fases desse trabalho, e pela confiança e respeito a mim oferecidos mesmo em momentos de maior dificuldade.

Ao amigo Prof. Dr. César Moreira, que há tempos compartilha comigo seu vasto conhecimento sobre geologia, e pelas inúmeras experiências práticas que tive ao seu lado.

Aos técnicos dos laboratórios de Geofísica e Geotecnia, do IGCE/UNESP, Francisco Manuel Garcia Barrera (Paco) e Alan de Oliveira, por seus valiosos auxílios, informações e ensinamentos oferecidos durante essa pesquisa.

Aos companheiros de pós-graduação, pelas amizades, discussões, e aprendizado compartilhado.

Este trabalho contou com o apoio da Coordenadoria de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, sob a forma de bolsa, e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP.

## SUMÁRIO

	Página
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Considerações Gerais	1
1.2 – Justificativas e Objetivos	3
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 – Estudos em Escala de Campo	5
2.2 – Estudos em Escala de Laboratório	7
2.3 – Caracterização do Contaminante	9
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1 – Local de Estudo	12
3.2 – Dispositivos de Medição	18
3.2.1 – Sondas Elétricas	18
3.2.2 – Dispositivo de Superfície	19
3.3 – Sistema de Controle do Nível de Saturação	20
4 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
4.1 – Condução Elétrica no Meio Geológico	24
4.1.1 – Considerações Gerais	24
4.1.2 – Dielétricos	25
4.1.3 – Eletrólitos Líquidos	25
4.2 – Métodos Geofísicos	26
4.2.1 – Eletroresistividade	26
4.2.2 – Polarização Induzida	30

4.2.3 – Potencial Espontâneo	34
4.3 – Técnicas e Arranjos	38
4.3.1 – Considerações Gerais	38
4.3.2 – Caminhamento Elétrico	39
4.3.3 – Perfilagem Elétrica	43
5 – AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	45
5.1 – Aquisição dos Dados	45
5.1.1 – Caminhamento Elétrico	47
5.1.2 – Perfilagem Elétrica	48
5.1.3 – Equipamento	49
5.2 – Processamento dos Dados	50
6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
6.1 – Apresentação dos Resultados	51
6.1.1 – Caminhamento Elétrico	52
6.1.2 – Perfilagem Elétrica	55
6.2 – Discussões	64
7 – CONCLUSÕES	73
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
APÊNDICE A	82
APÊNDICE B	96
APÊNDICE C	122

## RESUMO

Estudos ambientais envolvendo investigação e mapeamento do meio geológico por meio de métodos geoeletricos apresentam resultados satisfatórios para contaminantes iônicos (chorume) que sugerem eficácia no emprego desses métodos em situações que apresentem alterações dos componentes do subsolo devido à presença de combustíveis, como o etanol. Integrando a aplicação dos métodos geofísicos da eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo, por meio das técnicas de caminhamento elétrico e perfilagem elétrica foi monitorada a variação temporal dos parâmetros físicos resistividade, cargabilidade elétrica e potencial espontâneo em sedimentos arenosos alterados devido à contaminação controlada de etanol, contidos em um tanque de monitoramento. O tanque de monitoramento contém um sistema de controle do nível de saturação, possibilitando análises das variações nos parâmetros geoeletricos investigados em dois extratos geoeletricos: *insaturado* e *saturado*. O presente trabalho objetiva avaliar o comportamento do etanol num experimento que simula condições hidrogeológicas reais, bem como caracterizar as variações temporais nos parâmetros geoeletricos analisados. Este tipo de pesquisa objetiva também a geração de subsídios técnico/científico que auxiliem a compreensão de estudos de caso em ambientes naturais.

**Palavras-chave:** eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo, etanol, monitoramento.

## ABSTRACT

Environmental studies involving research and mapping of geological environment by geoelectrical methods present satisfactory results for ionic contaminants (leachate) that suggest effectiveness in their use in situations that present changes in components of the basement due to the presence of fuels such as ethanol. Integrating the application of geophysical methods of resistivity, induced polarization and spontaneous potential, through the techniques of electrical profiling and electrical profiling was monitored temporal variation of physical parameters, resistivity, chargeability and electrical spontaneous potential in sandy sediments changed due to contamination of controlled ethanol contained in a tank monitoring. The tank contains a monitoring system to control the saturation level, allowing analysis of variations in geoelectrical parameters investigated in two extracts geoelectrical: unsaturated and saturated. This study aims to evaluate the behavior of ethanol in an experiment that simulates actual hydrogeological conditions and to characterize temporal variations in geoelectrical parameters analyzed. This type of research also aims to generate subsidies technical / scientific understanding to help the case studies in natural environments.

**Key-Words:** resistivity, induced polarization, spontaneous potential, ethanol, monitoring.

# 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Devido à necessidade mundial em reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa, como o monóxido de carbono, que é emitido pela queima de combustíveis fósseis, é necessário o desenvolvimento de modelos energéticos alternativos que resultem em impactos menores ao meio físico, seja pela emissão de gases tóxicos à atmosfera ou pela contaminação do meio geológico pela presença desses compostos.

Frente ao grande potencial de produção do etanol como combustível para veículos movidos por motores à combustão no Brasil, sobretudo pelo clima favorável e a vasta área disponível para a plantação da cana-de-açúcar, este combustível é amplamente utilizado no transporte e utilização para esses veículos.

Em estudos realizados por Marques (2009), foi constatado importância do etanol como combustível em veículos automotivos no Brasil. O autor aponta o grande potencial de crescimento na produção do etanol de cana-de-açúcar, pois a área plantada atualmente atinge 0,5% do território nacional, sendo que 9% são usadas para agricultura e 42% são ocupadas por propriedades rurais.

É relevante que o etanol apresenta algumas características distintas das encontradas em combustíveis fósseis, como composição e origem, conferindo à esse combustível particularidades no que tange aos estudos envolvendo contaminações do meio geológico.

Os combustíveis fósseis, como a gasolina e o óleo diesel, são constituídos por hidrocarbonetos, sobretudo os compostos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) e são classificados como LNAPL (fase líquida leve não aquosa), além de serem imiscíveis com água. O etanol (álcool combustível) é de origem orgânica, obtido por meio da destilação do melaço da cana-de-açúcar, e apresenta grande miscibilidade com água.

Devido ao uso intenso desses combustíveis, existe uma ampla rede de transporte e distribuição, sendo freqüente a ocorrência de vazamentos com impacto direto nos solos e águas subterrâneas.

O comportamento de contaminantes fluidos em contato com o meio geológico está associado as suas propriedades físico-químicas, de características dos materiais que constituem o terreno, entre outras variáveis como temperatura (FERREIRA & ZUQUETTE, 1998).

A identificação e o diagnóstico de áreas contaminadas é um procedimento necessário afim de que seja possível tomar medidas de contenção da fonte poluidora e posterior remediação.

O uso combinado de poços de amostragem e métodos geofísicos constitui uma maneira adequada para identificação e o monitoramento de áreas contaminadas.

Esses métodos são utilizados principalmente nas fases de prevenção, para caracterização geológica e identificação de áreas vulneráveis, como terrenos com elevada permeabilidade e nível freático raso. Nas etapas de avaliação preliminar e diagnóstica, a geofísica pode ser aplicada para delimitação 2D e 3D de plumas de contaminação, e determinação das áreas de maior concentração de contaminantes.

Aplicações recentes da geofísica envolvem o monitoramento de áreas contaminadas por compostos derivados do petróleo, por meio da avaliação temporal para controle de fluxo, redução dos teores e possíveis alterações físico-químicas resultantes da dispersão, diluição e degradação dos compostos (MOREIRA & DOURADO 2005, MOREIRA *et al.* 2006, LIMA *et al.* 2005).

Na presente pesquisa foram aplicados métodos geoeletricos em um ambiente montado sob condições planejadas, de caráter experimental, com proporções reduzidas e características similares às verificadas no meio geológico, definindo um modelo controlado em escala de laboratório. A montagem desse ambiente tem como objetivo evidenciar os impactos de uma contaminação induzida em sedimentos arenosos por etanol por meio dos métodos geofísicos da eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo.



## 1.2 –JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

Diversos estudos geofísicos foram realizados para investigação e caracterização de casos reais de áreas alteradas pela presença de combustíveis de origem fóssil, como a gasolina e óleo diesel (ELLERT *et al.* 1988; BENSON *et al.* 1997; AZAMBUJA *et al.* 1999; ATEKWANA *et al.* 2000; SAUCK 2000; CASSIDY *et al.* 2001; MOREIRA & DOURADO 2005). Contudo, praticamente inexistem estudos que abordem os efeitos causados pela presença de etanol no meio geológico.

Diante desta deficiência de estudos, se torna relevante o desenvolvimento de pesquisas que abordem este tema.

Além deste fato, um estudo em escala laboratorial possibilita a obtenção de padrões de variação de parâmetros físicos na zona saturada e insaturada, algo relevante, pois o etanol é um combustível de origem orgânica e miscível com água, característica não apresentada em combustíveis fósseis.

Nos ensaios geoeletricos foram utilizados dispositivos auxiliares de medição, como sondas elétricas para investigações *in situ*, e dispositivo de superfície para realização de caminhamentos elétricos. O emprego desses dispositivos foi efetuado em função do sucesso verificado em estudos anteriores, que apontam resultados satisfatórios da utilização de dispositivos análogos aos utilizados na presente pesquisa, para investigações em litologias predominantemente arenosas. (BRAGA *et al.* 2008; TAIOLI *et al.*, 2006).

O presente estudo tem como objetivo geral a análise do comportamento do etanol em sedimentos saturados e insaturados por água, por meio do monitoramento dos parâmetros físicos resistividade elétrica, cargabilidade e potencial espontâneo, medidos por métodos geoeletricos.

Os objetivos específicos da pesquisa podem ser relacionados como se segue:

- Análise da sensibilidade em medições por meio de técnicas distintas, como perfilagem e caminhamento elétrico.
- Monitoramento das variações temporais dos parâmetros geoeletricos resistividade, cargabilidade e potencial espontâneo.
- Estabelecimento de correlações entre os parâmetros físicos medidos na zona saturada e zona insaturada.

- Avaliação do potencial de aplicação desses métodos geofísicos em investigações de áreas contaminadas por etanol.

## 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – ESTUDOS EM ESCALA DE CAMPO

No trabalho de Porsani, J.L., *et al* (2004) são apresentados resultados de investigações geofísicas de poço e de superfície, por meio dos métodos de sísmica rasa (reflexão e refração), eletrorresistividade (caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical) e Radar de penetração no solo (GPR). A área de estudos é um local controlado, constituída por sedimentos areno-argilosos da Bacia de São Paulo. Os ensaios foram realizados com o objetivo de caracterizar os sedimentos e analisar a litologia, delimitando o topo do embasamento da área de estudo. Os autores apontam que os resultados dos métodos geofísicos utilizados apresentaram boa concordância em relação com os dados geológicos descritos nos poços.

Com o objetivo de avaliar as potencialidades de integração dos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida, Moura. & Malagutti Filho (2007) realizam um estudo no aterro controlado na cidade de Piracicaba/SP. A interpretação dos resultados permitiu caracterizações dos materiais geológicos presentes na área, profundidade do nível d'água e sentido do fluxo subterrâneo. Os autores apontam a eficácia do método da polarização induzida no mapeamento de resíduos sólidos existentes.

Um estudo visando correlações geológico-geoelétrica foi realizado por Draskovits *et al.* (1990) para os métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida, por meio das técnicas de campo da sondagem elétrica vertical e perfilagem elétrica. Dentre as considerações feitas pelo autor, vale destacar as seguintes:

- A resposta IP em camadas com misturas de areias e argilas é bem maior que a resposta em camadas argilosas puras.
- Argilas puras apresentam baixa resistividade e baixa polarização.
- Camadas arenosas apresentam alta resistividade e cargabilidade intermediária.
- Camadas siltosas apresentam alta polarização e resistividade intermediária.

Foi utilizado por Moreira & Braga (2008) o método da polarização induzida em estudo para determinação da área de percolação do material lixiviado oriundo de um

aterro de resíduos sólidos domiciliares do tipo vala, localizado município de Cordeirópolis/SP. Segundo os resultados obtidos pela pesquisa, os autores sugerem associação de anomalias de alta cargabilidade nas valas recentemente fechadas do aterro a prováveis acúmulos de minerais férricos nas bases das mesmas, enquanto as valas mais antigas apresentam parâmetros que tendem ao valor do background da área, pressupondo a decomposição natural dos resíduos.

Nos estudos de Lima *et al.* (1995) foram combinadas as técnicas de Caminhamento Elétrico e Sondagem Elétrica Vertical em um aterro de efluentes derivados do petróleo. Os autores descrevem uma coincidência entre intervalos de baixa resistividade e áreas com grandes concentrações de efluentes.

No trabalho de revisão do método do potencial espontâneo, Gallas (2005) descreve os princípios teóricos do método e suas aplicações atuais, visando explorar suas causas e aplicações atuais e remotas. Este autor descreve que o método é susceptível à ruídos de origem artificial ou natural, que eventualmente ocasionam problemas na aquisição e interpretação de dados. Dentre as interferências apontadas, é possível destacar: polarização de eletrodos, resistência de contato elevada e oscilações temporais.

Foram estabelecidas algumas conclusões sobre os fenômenos correspondentes ao método do potencial espontâneo em estudos realizados por Sato e Mooney (1960), em função de análises de estudos geoeletricos anteriores que do método se utilizaram, como se segue:

- Corpos com boa condução eletrônica podem gerar a polarização espontânea.
- Nas proximidades superiores dos corpos geradores as anomalias de polarização espontânea geralmente resultam em valores negativos.
- Os valores de potencial espontâneo normalmente são de baixo valor, variando de centésimos de mV a pequenas unidades de V.
- O corpo deve se encontrar, mesmo que parcialmente, na zona de oxidação ativa.
- O potencial espontâneo é relativamente estável no tempo.

Em estudos realizados por Ward (1990), foram analisados diversos arranjos para a aplicação da técnica do caminhamento elétrico quanto à resolução, especificamente para a resistividade. Segundo o autor, os arranjos Wenner e

Schlumberger são os mais eficazes em termos de resolução vertical, enquanto que o arranjo Gradiente se configura como o mais eficiente quanto às resoluções laterais.

## 2.2 – ESTUDOS EM ESCALA DE LABORATÓRIO

Visando um estudo acerca do comportamento da gasolina com 20 % de etanol (E-20) e da gasolina pura, Ferreira, S.M. *et al.* (2004) simularam um vazamento em escala laboratorial por meio de colunas de sedimentos. Os resultados apontam a maior solubilidade da gasolina E-20 em relação à gasolina pura, devido à efeitos de co-solvência entre o etanol e a água presente no subsolo.

Em estudos em escala laboratorial realizados por Atekwana *et al* (2004), foram realizadas medidas de condutividade aparente *in situ* associadas a medidas de distribuição de populações microbiais em um sítio controlado, contaminado por combustíveis de fase líquida não aquosa (LNAPL). Os resultados apontam picos de condutividade em alguns pontos investigados, em contraste com os modelos geoeletricos que apontam baixas condutividades. O pico de condutividade foi associado a regiões impactadas por LNAPL residual e livre. As zonas com altos valores de condutividade coincidiram com as de grande incidência de populações microbiais. Os autores constataam uma relação direta entre atividade bioquímica das populações microbiais com valores elevados de condutividade, e sugerem a aparecimento de fluidos condutivos gerados na biodegradação dos hidrocarbonetos.

No trabalho de Gallas & Verma (2006), são realizados estudos de eletrorresistividade e polarização induzida aplicados em modelos cilíndricos e tabulares em escala laboratorial, com o objetivo de compará-los com situações reais de detecção de mineralizações e de alvos que apresentam contrastes de resistividade e cargabilidade.

Outros trabalhos em escala laboratorial realizam estudos de modelagem analógica por meio da aplicação de métodos geoeletricos, e descrevem as vantagens e desvantagens desse tipo de experimento e dos dispositivos utilizados (APPARAO *et al.* 1997; BARKER, R.D. 1989; AIKEN *et al*, 1973; SUMNER, 1976; BERTIN & LOEB, 1976).

Com o objetivo de estimar a profundidade limite de detecção de modelos condutivos e resistivos em escala laboratorial utilizando o método da eletrorresistividade, Apparao *et al* (1992 e 1997) efetuaram medidas em um tanque

com água onde foram submersos corpos esféricos, cilíndricos e tabulares constituídos de alumínio (metal condutivo) e ebonite (material sintético de elevada resistividade). Os autores atestam que as profundidades de detecção foram maiores para os corpos condutivos, sugerindo algumas limitações do método da eletrorresistividade em áreas essencialmente resistivas.

Estudos geofísicos em escala laboratorial acerca do método da eletrorresistividade foram realizados por Sumner (1976). O autor salienta que o parâmetro resistividade varia de forma linear em função dos potenciais elétricos medidos. Desta forma, é possível a determinação de potenciais de forma indireta, pois o produto das resistividades por um fator de escala resulta em valores de potenciais proporcionais (SUMNER, 1976).

Estudos geofísicos em escala laboratorial foram realizados por Atekwana *et al.* (2000), para avaliação do comportamento geoeletrico em locais contaminados por combustíveis fósseis. Os autores apontam que em locais onde ocorram alterações químicas significativas do hidrocarboneto, devem ocorrer mudanças na assinatura geoeletrica de resistiva para condutiva. Afirmam ainda que é possível a existência dessa zona condutiva devido à biodegradação do contaminante.

Por meio da aplicação do método da eletrorresistividade em um local contaminado por combustíveis fósseis, Werkema *et al.* (2003) destacam a presença de grandes quantidades de bactérias degradadoras em áreas com baixos valores de resistividade elétrica. Os autores sugerem a influência da atividade biológica na magnitude do parâmetro físico.

Estudos geofísicos de contaminações de aquíferos por combustíveis fósseis em escala laboratorial foram realizados por Cassidy, *et al.* (2001). Os autores sugerem que a biodegradação desses compostos sob condições aeróbicas e anaeróbicas podem ocasionar mudanças consideráveis nas condições biogeoquímicas do aquífero, com queda drástica de resistividade elétrica.

Um estudo de contaminações rasas em escala laboratorial foi realizado por Taioli *et al.* (2006). O estudo apresenta um dispositivo elaborado para medidas de resistividade elétrica, composta por uma fonte de corrente alternada e uma ponteira de PVC com eletrodos para medição. Os resultados foram satisfatórios nas faixas de resistividade estudadas e propõe aplicações para o dispositivo, como estudo de contaminações rasas em áreas arenosas.

O estudo de Braga *et al.* (2008) monitorou a dinâmica de evolução de uma contaminação em escala laboratorial com o objetivo de determinar o comportamento temporal do hidrocarboneto em relação ao parâmetro físico resistividade elétrica. Os resultados sugerem um aumento da resistividade associada aos primeiros períodos pós-contaminação, seguida de uma relativa estabilidade e posterior queda dos valores e tendência de retorno às condições naturais.

### 2.3 – CARACTERIZAÇÃO DO CONTAMINANTE

Segundo estudos sobre a importância do desenvolvimento de pesquisas e tecnologias, o etanol pode ser um importante agente na redução de emissão de gases causadores do efeito estufa como a queima de combustíveis fósseis, além de substituir parcialmente o petróleo e alongar sua vida útil. O etanol já possui um consumo efetivo de mais de 50 bilhões de litros por ano em escala mundial.

O etanol (CH<sub>3</sub> CH<sub>2</sub>OH), também chamado álcool etílico, é uma substância obtida da fermentação de açúcares. No Brasil, esta substância é muito utilizada como combustível de motores de explosão, constituindo assim um mercado em ascensão.

O etanol é o mais comum dos álcoois. Os álcoois são compostos que têm grupos hidroxila ligados a átomos de carbono. Podem ser vistos como derivados orgânicos da água, em que um dos hidrogênios foi substituído por um grupo orgânico (Figura 2.1).

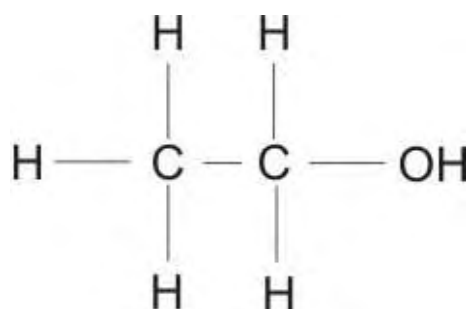


FIGURA 2.1: Estrutura química do etanol

O etanol ou álcool etílico hidratado combustível (AEHC) é um produto resultante da destilação final decorrente do processo de obtenção de açúcar de cana, caracterizado como uma mistura hidroalcoólica com teor alcoólico mínimo de

92,6º INPM. O produto foi especificado pela ANP por meio da Resolução ANP nº 36, de 6/12/2005.

Utilizado principalmente como combustível para veículos e também como produto de limpeza doméstica ou industrial, quando utilizado nas concentrações recomendadas.

São estabelecidas as especificações técnicas do Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC), comercializados por diversos agentes econômicos no território nacional, como destinado para utilização como combustível para motores de combustão interna com ignição por centelha, enquanto o Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC) é destinado para a mistura com gasolina tipo A, para a formulação da gasolina tipo C. (ANP, 2002).

Estudos sobre a importância do etanol na atenuação natural de águas subterrâneas impactadas por gasolina foram realizados por Nunes et al (2007). Foram avaliados os resultados de um experimento de derramamento controlado de gasolina brasileira em água subterrânea durante 6,5 anos. A exaustão do etanol aos 32 meses de monitoramento, e a significativa redução de mais de 90% da massa máxima dos compostos BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno) dissolvidos no meio aos 79 meses, demonstraram a eficácia da atenuação natural nas contaminações de águas subterrâneas. Somente após a exaustão do etanol, ocorrida após 32 meses, foi iniciada a redução de massa de BTEX. Os resultados revelam que a biodegradação do etanol permitiu a formação de uma barreira natural que, após a sua completa degradação, acelerou a taxa de biodegradação dos BTEX e impediu o avanço da pluma.

No trabalho de Corseuil, *et al.* (1997) são investigados os impactos da contaminação de aquíferos por gasolina e etanol. Os autores apontam que a concentração do etanol deverá ser maior que a dos compostos BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno) em águas subterrâneas contaminadas com misturas de etanol e gasolina, em função de sua maior mobilidade quando em contato com água que os verificados exclusivamente na gasolina. Constatam que o etanol pode também ser biodegradado em preferência aos BTEX e consumir todo o oxigênio necessário para a degradação dos hidrocarbonetos monoaromáticos. Além disso, o etanol pode ser tóxico ou inibitório para os microorganismos degradadores dos hidrocarbonetos presentes na gasolina.



Em estudos realizados por Zanetti (2009) foram realizadas medidas de condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico (pH) e potencial de oxidação (Eh) em sedimentos e águas subterrâneas contidos num tanque, contaminados por gasolina e etanol (álcool combustível). Os resultados apontam relações inversamente proporcionais entre condutividade elétrica e Eh, assim como entre Eh e pH. Vale salientar o comportamento do parâmetro Eh, que pode ser associado ao parâmetro geoeletrico potencial espontâneo.

O efeito do etanol no aumento da solubilidade de compostos aromáticos presentes na gasolina brasileira (22% de etanol) foi analisado por Fernandes, *et al.* (1996) em estudos laboratoriais. Os resultados dos experimentos indicam que contaminações do lençol freático causadas pelo contato da gasolina comercial brasileira com a água subterrânea poderão apresentar maior magnitude que as causadas por gasolinas convencionais de outros países. Os autores sugerem que isso pode ocorrer em função da capacidade do etanol em aumentar a solubilização dos hidrocarbonetos na água. Os experimentos realizados em laboratório mostram que o aumento da massa total de BTEX é de aproximadamente 30%, para uma fração de etanol na fase aquosa de 10. Como o efeito co-solvência é mais significativo para os constituintes da gasolina mais hidrofóbicos, é provável também que altas concentrações de etanol na água do aquífero facilitem uma maior solubilização de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Os autores apontam que a presença de uma massa de hidrocarbonetos de petróleo associada ao etanol pode dificultar a remediação de aquíferos porventura contaminados por esses combustíveis.

## 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 – LOCAL DE ESTUDO

Experimentos geofísicos em escala laboratorial podem resultar dados importantes para a compreensão de casos reais em campo, bem como estabelecer padrões, para o caso de materiais ou corpos geológicos e tendências, para o caso de aquíferos ou águas contaminadas.

Diversos trabalhos realizam esse tipo de estudo com o objetivo de avaliar os impactos causados pela contaminação por combustíveis de origem fóssil, como a gasolina e óleo diesel (CASSIDY *et al.* 2001; BRAGA *et al.* 2008, LIMA *et al.* 2005).

A utilização de modelos controlados para o estudo de contaminações possibilita o entendimento da dinâmica e do comportamento temporal desses compostos. Fenômenos de degradação, dispersão e diluição produzem alterações das propriedades físicas em solos, rochas e águas subterrâneas. As alterações das propriedades físicas do meio geológico nessas condições são passíveis de detecção pelos métodos geofísicos. Os métodos geoeletricos são especialmente aplicáveis nesses casos devido à ampla gama de variação das propriedades elétricas em áreas contaminadas.

Frente aos fatores supracitados, foi estruturado um ambiente em escala laboratorial no qual foi monitorado o comportamento geoeletrico de sedimentos saturados e insaturados que foram alterados por uma contaminação induzida e controlada por etanol.

Foram realizados ensaios geoeletricos de referência no local de estudo, visando caracterizar o comportamento natural da área sem a presença do contaminante. Com isso, foi possível o estabelecimento de comparações nos valores obtidos no *background* da área em relação aos medidos nos ensaios que analisaram os sedimentos com a presença do etanol, em função do tempo, caracterizando o monitoramento geofísico.

A estruturação de um ambiente com condições controladas tem como objetivo caracterizar a dinâmica da evolução temporal dos parâmetros resistividade elétrica, cargabilidade e potencial espontâneo.

O local de estudo compreende um tanque ao qual foram adicionados sedimentos arenosos e água, posteriormente contaminados por etanol. O experimento foi monitorado por meio da aplicação dos métodos geoeletricos da eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo. A contaminação foi monitorada por meio dos dispositivos auxiliares, para a aplicação das técnicas de caminhamento elétrico e perfilações.

Estes dispositivos foram instalados em pontos predeterminados visando avaliar o comportamento temporal do contaminante em diversas posições do tanque.

O tanque de monitoramento foi coberto por uma lona plástica para minimizar os impactos em seus dispositivos gerados em dias de forte chuva, e para atenuar a entrada de água de chuva nos sedimentos, que ocasionaria alterações indesejadas nos níveis de saturação.

O tanque de monitoramento é composto de fibra de vidro, com as seguintes dimensões: 2,5 m (comprimento) x 1,5 m (largura) x 0,50 m (altura) (Figura 3.1). Esse tanque foi preenchido com sedimentos arenosos inconsolidados, atingindo um espaço interno de 2,34 m (comprimento) x 1,34 m (largura) x 0,47 m (altura) (Figura 3.1).

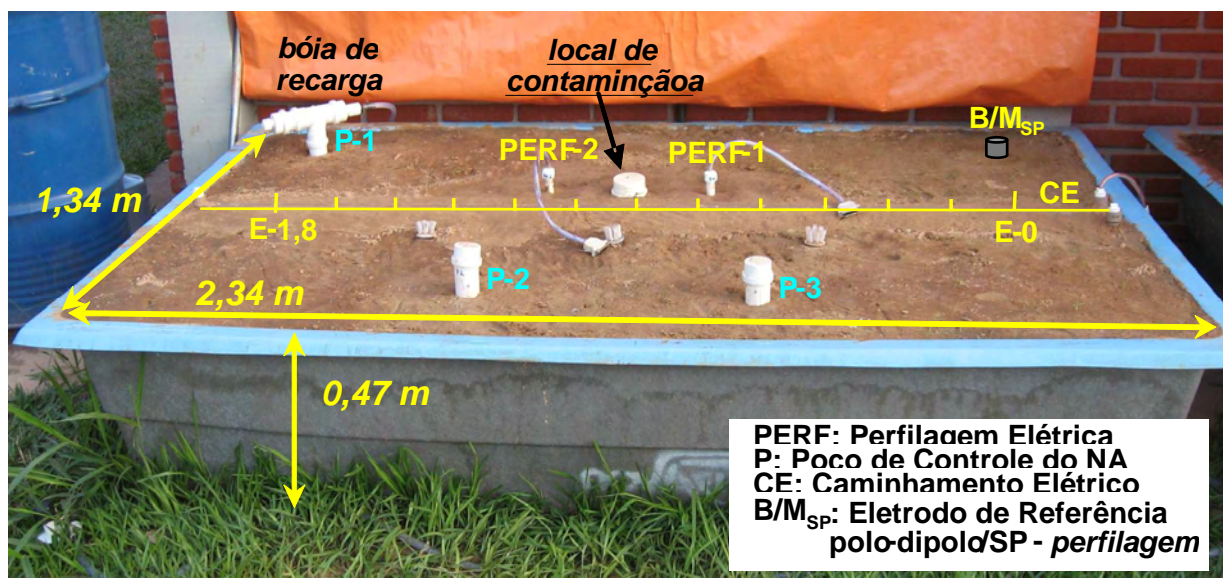


FIGURA 3.1 - Tanque de Monitoramento

Posteriormente foi introduzido água no experimento para o estabelecimento de uma zona saturada. A água utilizada é proveniente da rede de abastecimento do município.

A manutenção dos níveis de saturação parcial dos sedimentos foi realizada por um sistema de abastecimento de água instalado no tanque de monitoramento, controlado por meio de uma bóia de recarga (P-1) conectada a uma torneira externa que mantém os sedimentos preenchidos por água a níveis que foram pré-determinados por meio de poços (P-2 e P-3).

A saturação parcial dos sedimentos teve como objetivo simular as condições reais de campo. A característica de miscibilidade do contaminante na água permite monitorar seu comportamento por longos períodos. A eventual contaminação do experimento insaturado resultaria num breve período de monitoramento, devido à elevada volatilidade do contaminante.

A existência de níveis de saturação proporcionou o estabelecimento de padrões nas variações temporais dos parâmetros em relação às águas subterrâneas, e sua influência quando em contato com o contaminante, que é caracterizado como miscível, diferentemente de combustíveis como a gasolina e o óleo diesel. A montagem do tanque de monitoramento foi realizada com o objetivo de obter um volume máximo de sedimentos (Quadro 3.1 e 3.2). A montagem se iniciou com a deposição dos sedimentos de maneira irregular (Quadro 3.1-A), posteriormente os sedimentos foram uniformizados e nivelados manualmente (Quadro 3.1-B e 3.2-A).

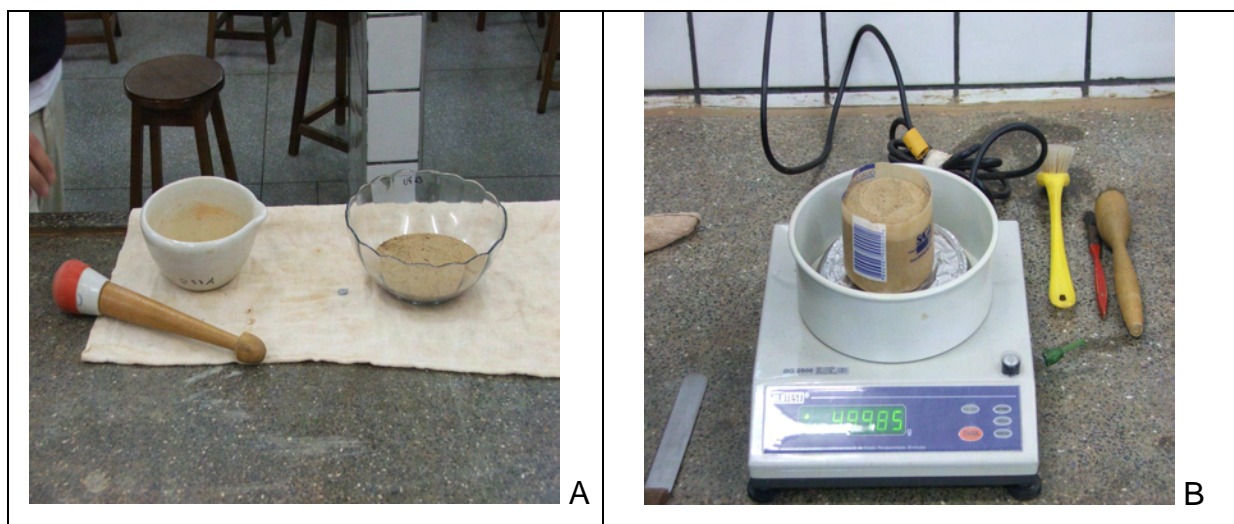


QUADRO 3.1 – Montagem do tanque de monitoramento. A) Deposição dos sedimentos, B) Uniformização.

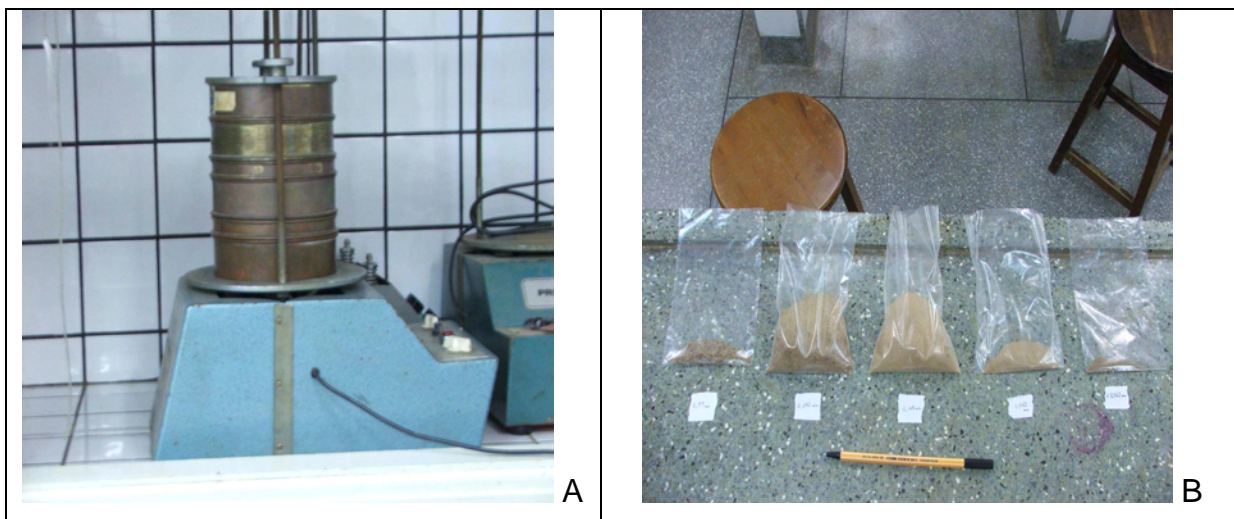


QUADRO 3.2 – Montagem do tanque de monitoramento. A) Nivelamento, B) Tanque finalizado com sedimentos.

Os sedimentos utilizados consistem em areia de granulação fina e média, comercializada em lojas de materiais de construção. Este material foi submetido ao procedimento de peneiramento e análise granulométrica conjunta (Quadro 3.3 e 3.4).



QUADRO 3.3 – Análise granulométrica. A) Preparação da amostra, B) Pesagem



QUADRO 3.4 – Análise granulométrico. A) Peneiramento, B) Frações peneiradas.

O procedimento começou com a pesagem de 500g de amostra, que foram levadas à estufa por um período de 24 horas. A amostra seca foi macerada e peneirada com um conjunto de quatro peneiras.

As diferentes frações do material foram pesadas e classificadas segundo o diâmetro de seus grãos e tabeladas (Tabela 3.1).

Os resultados obtidos na pesagem das frações peneiradas foram expressos em porcentagem e os sedimentos foram classificados segundo a norma ABNT-NBR 6502/95 (Figura 3.2).

TABELA 3.1 – Pesagem das frações peneiradas

MALHA (mesh)	MALHA (mm)	MASSA (gramas)	PORCENTAGEM (%)
30	0,590	13,450	2,69
70	0,210	255,140	51,02
140	0,105	214,780	42,95
230	0,062	14,330	2,86
PRATO	< 0,062	2,300	0,48

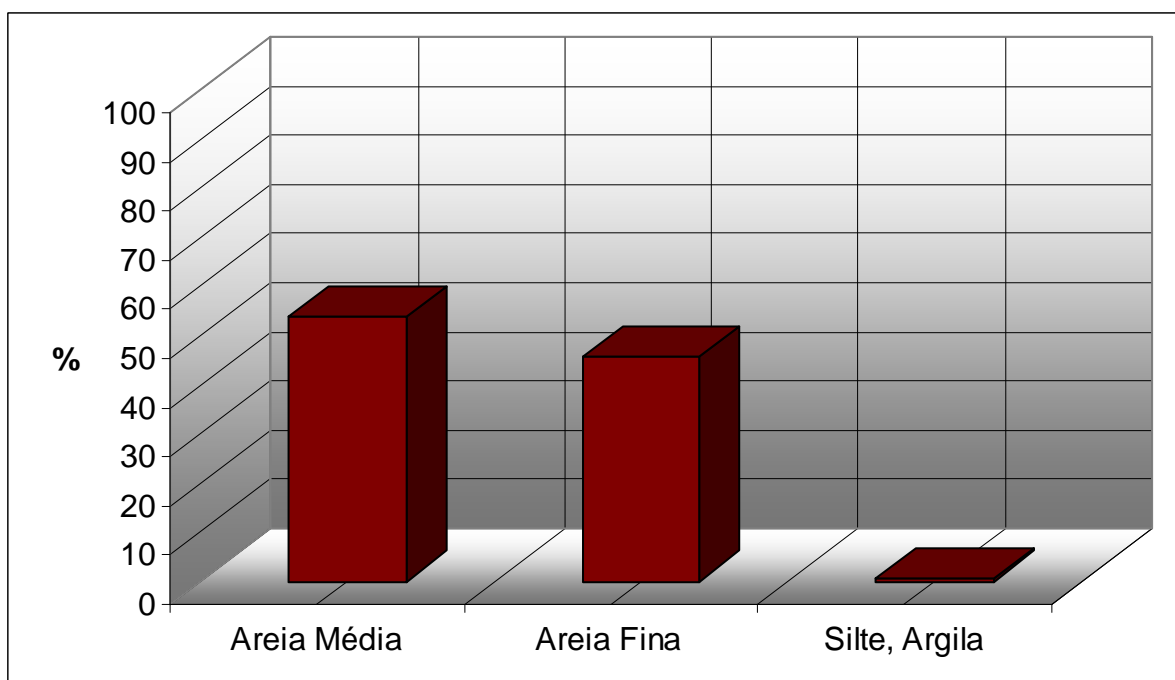


Figura 3.2 – Porcentagem Granulométrica

A contaminação foi realizada na posição central do local de estudo (Figura 3.1), visando reduzir os efeitos de borda associados às paredes do tanque. Nestes locais podem ocorrer distorções do campo elétrico, que podem eventualmente o experimento. (GALLAS, 2006).

A contaminação por etanol foi controlada na posição central do tanque, junto ao eletrodo E-0,90 do dispositivo de caminhamento elétrico e no centro das sondas de perfilagem, as quais estão separadas por 40 cm, simulando um vazamento pontual, caracterizando uma contaminação rasa (Figura 3.3). O volume de etanol inserido no tanque de monitoramento foi de 20 litros.



FIGURA 3.3 - Local da contaminação

## 3.2 – DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

### 3.2.1 – SONDAS ELÉTRICAS

Foram instaladas duas sondas elétricas (PERF1 e PERF2) (Figura 3.1), que propiciaram ensaios de Perfilagem Elétrica *in situ*. O uso das sondas teve por objetivo o monitoramento multinível do experimento, baseado na hipótese de estratificação do contaminante, tanto na zona saturada quanto na zona insaturada.

As sondas foram desenvolvidas com base no arranjo Wenner, nas dependências do Laboratório de Geofísica – IGCE/UNESP.

Os circuitos elétricos cruzam o interior da sonda, e estão em contato com anéis externos compostos de chumbo, permitindo a comunicação dos dispositivos com o equipamento e possibilitando a aquisição dos dados de perfilagem elétrica no tanque de monitoramento. O chumbo foi utilizado nos anéis das sondas pela baixa capacidade de polarização desse metal.

A utilização das sondas permitiu um monitoramento multinível do movimento do etanol quando em contato com os sedimentos insaturados e saturados do tanque de monitoramento (Foto 3.1).

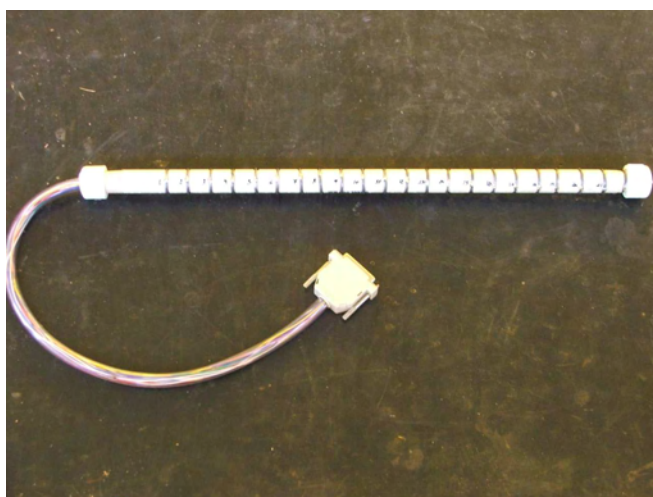


FOTO 3.1 – Sonda elétrica graduada, com detalhe dos anéis

As sondas são compostas por tubos de PVC (cloreto de polivinila) com 11,5mm de diâmetro, e 21 anéis de chumbo graduados de forma crescente da base para o topo espaçados a cada 2cm (Foto 3.2).





FOTO 3.2 – Detalhe dos eletrodos

O espaçamento utilizado nas perfilagens elétricas foi de 4,0cm, com deslocamento das leituras de 4,0cm.

Por meio desse dispositivo auxiliar foram realizados ensaios de Perfilagem Elétrica para eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo, permitindo medidas de profundidade para os ensaios realizados antes e após a contaminação dos sedimentos.

Os resultados das perfilagens foram relacionados com os níveis de saturação envolvidos em cada ensaio e associados com os resultados obtidos nos caminhamentos elétricos, auxiliando na interpretação dos mesmos.

### **3.2.2 – DISPOSITIVO DE SUPERFÍCIE**

Este dispositivo foi construído em PVC (cloreto de polivinila), e foi posicionado na superfície dos sedimentos para a realização de caminhamentos elétricos. Contém 15 contatos elétricos de chumbo em posições fixas, que funcionaram como eletrodos.

Os contatos são partes de um circuito elétrico interno e são ligados a fios permitindo a comunicação com o equipamento.

Os eletrodos possuem espaçamentos constantes de 0,15m, e são numerados de forma crescente (Foto 3.3).

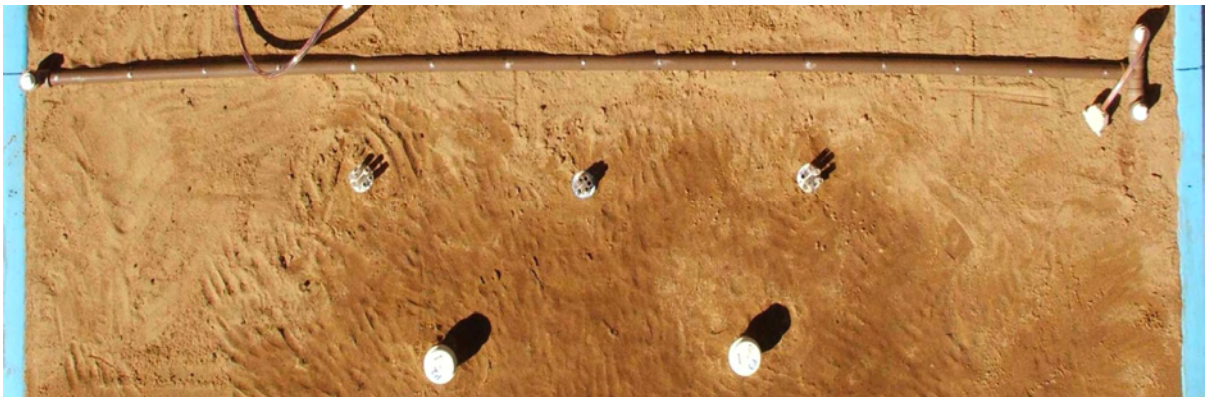


FOTO 3.3 – Dispositivo de Caminhamento Elétrico (visto em planta)

O ponto médio deste dispositivo elétrico foi posicionado ao lado do ponto de contaminação. Por meio deste foram realizadas medidas de resistividade elétrica e cargabilidade.

### 3.3 – SISTEMA DE CONTROLE DO NÍVEL DE SATURAÇÃO

Foi desenvolvido um sistema hidráulico para reposição de água no tanque, e posicionamento constante de nível freático, para divisão dos sedimentos em zona saturada e zona insaturada.

O sistema de recarga do nível d'água (NA) consiste num poço com uma bóia de recarga, torneira de distribuição e mangueiras para conexões (Foto 3.4). O nível freático foi monitorado por meio dos poços P-02 e P-03 (Figura 3.1).



FOTO 3.4 - Sistema de recarga do NA

A recarga da zona saturada foi mantida por meio do sistema de recarga do nível d'água. Os sedimentos foram abastecidos por meio de uma torneira de distribuição ligada à rede pública (Foto 3.5).



FOTO 3.5 - Torneira de distribuição

Para o controle da saturação nos tanques, foram instalados três poços construídos com tubos de PVC, com 50,0 cm de comprimento e 6,0 cm de diâmetro. Pequenos furos na parte inferior dos poços permitiram a entrada da água de maneira lenta, que ocasionou a distribuição da mesma com diminutos transportes de sedimentos. (Foto 3.6).



FOTO 3.6 - Poço de controle do NA (tubo de PVC)

Nos ensaios geelétricos realizados durante o monitoramento houve pequenas variações dos níveis d'água (NA's), que foram registrados com o auxílio dos poços de monitoramento P2 e P3 instalados no tanque de monitoramento.

A utilização da bóia de controle permitiu a reposição de água por diferença de pressão entre a coluna d'água do poço P1 e a pressão atmosférica, impedindo variações bruscas do NA durante os ensaios realizados (Foto 3.7 e Foto 3.8).



FOTO 3.7 – Bóia de Recarga



FOTO 3.8 – Detalhe da bóia

Os valores dos níveis d'água foram registrados separadamente, nas aquisições de caminhamento elétrico (CE) e perfilagem elétrica (PERF), sendo a média desses valores de 10,6cm para os caminhamentos elétricos e 11,5cm para as perfilagens elétricas (Tabela 5.1).

A constante manutenção do sistema de controle do nível de saturação foi necessária, em função de inúmeros desgastes ocorridos em seus componentes, como as mangueiras de conexão, a torneira de distribuição e na bóia de recarga instalada no poço P-1.

TABELA 5.1 - Valores de Nível D'Água

ENSAIO	Horas	Nível D'Água (cm)	
		CE	PERF
1	0	7,0	7,0
2	4	6,0	6,0
3	12	10,0	10,0
4	28	13,0	7,0
5	52	10,0	10,0
6	78	8,0	8,0
7	102	12,0	12,0
8	126	13,0	16,0
9	198	8,0	8,0
10	342	6,0	9,0
11	510	16,0	8,0
12	702	14,0	15,0
13	870	11,0	6,0
14	1038	7,0	9,0
15	1158	12,0	17,0
16	1326	15,0	18,0
17	1470	6,0	6,0
18	1590	8,0	8,0
19	1758	12,0	14,0
20	1878	12,0	13,0
21	2070	8,0	8,0
22	2238	15,0	14,0
23	2406	10,0	13,0
24	2574	14,0	14,0
25	2742	13,0	31,0
<b>MÉDIA</b>		10,6	11,5

A existência de cobertura no tanque de monitoramento minimizou a entrada de água de chuva, que poderia gerar alterações bruscas no nível d'água e inviabilizaria o funcionamento da bóia de recarga.

## 4 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 – CONDUÇÃO ELÉTRICA NO MEIO GEOLÓGICO

#### 4.1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

A aplicação de métodos geoeletricos requer o conhecimento das propriedades elétricas do meio geológico. O comportamento físico das rochas e do subsolo em geral depende dos minerais que os constituem, da forma de agregação, e dos volumes e preenchimentos de seus poros.

A condução de eletricidade é realizada pelo movimento de cargas elétricas. O meio geológico apresenta condução elétrica por meio de elétrons ou íons, distinguindo dois tipos de condução: eletrônica e iônica. Existem algumas diversidades entre esses dois tipos de condução elétrica. A condução iônica é mais lenta, e a passagem da corrente elétrica pelo movimento de íons resulta em transporte de material (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966).

Os componentes do meio geológico que apresentam condução eletrônica são os metais (condução metálica) e minerais semicondutores. São poucos os componentes da crosta terrestre que apresentam condução metálica, entre eles se encontram os metais nativos (ouro, prata, cobre e estanho).

Os minerais semicondutores são muitos e de grande importância para aplicação dos métodos geoeletricos, principalmente para prospecção mineral. O grau de condução desses minerais depende do tipo e do conteúdo de suas impurezas. A grande maioria desses minerais tem caráter amplamente resistivo, caracterizando-os como materiais isolantes, fato que praticamente inviabilizaria a passagem da eletricidade.

A condução do tipo iônica ocorre através de eletrólitos sólidos (dielétricos) e eletrólitos líquidos. Efetivamente, o subsolo se comporta como um condutor eletrolítico, sendo a propagação de corrente do tipo iônica, que se desenvolve através de moléculas que tenham excesso ou deficiência de elétrons (TELFORD *et al.* 2004).

### **4.1.2 – DIELÉTRICOS**

A estrutura dos corpos dielétricos normalmente possui elétrons fortemente ligados aos seus átomos, conferindo a eles um caráter isolante. A estabilidade dessas ligações permite elevados níveis de atração entre os elétrons e seus átomos, e a demanda energética para a separação se torna muito grande.

Os minerais que se comportam como dielétricos são muitos, entre eles estão os mais abundantes na natureza, tais como Calcita, Quartzo, Feldspatos, Fluorita, Hematitas, Micas, entre outros.

Frente à baixa capacidade de condução desses minerais, a passagem da corrente elétrica é realizada por cargas elétricas oriundas de impurezas e imperfeições existentes nas estruturas. A elevada agitação térmica dos íons pode ocasionar o desprendimento das cargas elétricas de seus estados de equilíbrio, gerando corrente elétrica.

A curva de variação de condutividade elétrica em função da temperatura nos minerais que se comportam como dielétricos é semelhante à correspondente para os minerais semicondutores, tais como calcopirita, magnetita, pirita, silvanita, cassiterita. Entretanto as condutividades para a classe dos minerais dielétricos são menores que as verificadas em minerais semicondutores.

Os níveis característicos de condução em função da temperatura em dielétricos são muito baixos, o que se revela em altos valores de resistividade associadas a esses materiais, da ordem de  $10^7 \Omega.m$  (ORELANA, 1972).

### **4.1.3 – ELETRÓLITOS LÍQUIDOS**

A condução iônica é gerada quando o material condutor se trata de um eletrólito líquido ou sólido, e o movimento das cargas elétricas se dá por meio do fluxo de cargas elétricas que constituem o material ou solução eletrolítica

As correntes elétricas que normalmente interessam em estudos de prospecção geoeletrica não recorrem de condutores ôhmicos, como fios metálicos habitualmente empregados em dispositivos de transmissão de eletricidade. Na grande maioria das litologias encontradas na natureza, a condução será iônica, sendo o meio condutor uma solução de água e sais comuns distribuídos de maneira complexa na estrutura dos poros da rocha (GALLAS, 2006).

Os poros e interstícios das rochas normalmente se encontram com preenchimento total ou parcial por eletrólitos, tornando-as estruturas passíveis de condução do tipo iônica através de movimentos dos íons constituintes desses eletrólitos. A corrente elétrica nos eletrólitos líquidos é gerada pelo movimento de cátions e ânions através da solução.

A água pura é pouco condutora, e pode ser caracterizada como isolante. As águas que se encontram na natureza normalmente são boas condutoras de eletricidade, por possuir sais dissolvidos, formando eletrólitos líquidos.

A resistividade específica de um eletrólito líquido pode ser entendida como a resistência elétrica medida em relação a um determinado volume do material.

A determinação da resistividade em eletrólitos de origem desconhecida se dá através do inverso da condutividade. A aquisição dos dados de condutividade em soluções com concentrações e taxas de dissociação indeterminadas é realizada com a utilização de instrumentos de medição específicos, os condutivímetros.

## **4.2 – MÉTODOS GEOFÍSICOS**

### **4.2.1 – ELETRORRESISTIVIDADE**

Classificado como um método geoeletrico, o método da eletrorresistividade investiga o parâmetro resistividade elétrica no meio geológico. Esse método é utilizado em larga escala em estudos geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos e ambientais, contemplando a utilização de diversas técnicas e arranjos nas aquisições de dados.

Nas aplicações em estudos geológicos esse método pode permitir o estabelecimento da profundidade da rocha sã e do nível freático, detectar falhas e fraturas, a estratigrafia das camadas, intrusões salinas, vazios subterrâneos e delimitar depósitos de resíduos domésticos e/ou industriais, bem como suas plumas de contaminação.

O parâmetro resistividade elétrica apresenta o maior intervalo de variações entre as propriedades físicas de minerais e rochas, excedendo sete ordens de magnitude entre seus extremos (DOBECKI & ROMIG, 1985).

Um mesmo tipo de litologia pode apresentar uma ampla gama de variação nos valores de resistividade. Os minerais são razoavelmente consistentes em suas



características elétricas, mas num agregado, como ocorre na natureza, a variação total de suas resistividades é muito maior (SUMNER, 1976).

Uma rocha condutora de corrente elétrica pode ser considerada como sendo um agregado com estrutura de minerais sólidos, líquidos e gases, na qual sua resistividade é influenciada pelos seguintes fatores (IAKUBOVSKII & LIAJOV 1980 *appud* BRAGA, 2006).

- resistividade dos minerais que formam a parte sólida da rocha;
- resistividade dos líquidos e gases que preenchem seus poros;
- umidade e porosidade da rocha;
- textura da rocha e a forma e distribuição de seus poros;
- processos que ocorrem no contato dos líquidos contidos nos poros e a estrutura mineral.

Como demonstrado por diversos autores, as resistividades das águas que saturam os materiais no subsolo, podem apresentar uma variação muito ampla. Na maioria dos casos, estas soluções aquosas contêm diversos sais minerais dissolvidos, sendo um dos principais o cloreto de sódio (NaCl). A resistividade das águas é inversamente proporcional à concentração destes sais dissolvidos.

A quantidade e tipo desses sais minerais dependem da natureza das rochas nas quais as águas tenham percolado em seu fluxo de superfície, ou subterrâneo. Diante da existência dos minerais nas rochas, os quais são considerados isolantes em termos de propagação da corrente elétrica, estas seriam mal condutoras de eletricidade, sendo consideradas praticamente isolantes e de assinatura geoeletrica altamente resistiva. Em alguns casos, as rochas com quantidade apreciável de alguns minerais semicondutores, poderiam ser consideradas condutoras.

A resistividade em rochas e solos está condicionada ao preenchimento de seus poros e interstícios por água contendo sais dissolvidos, formando eletrólitos líquidos. A formação desses eletrólitos líquidos gera condução do tipo iônica, que estará condicionada aos graus de concentração e dissociação de sais na solução eletrolítica formada.

De acordo com a segunda Lei de Ohm, define-se a relação entre a resistividade ( $\rho$ ) e a resistência (R) de um condutor homogêneo, de formato cilíndrico com comprimento (L) e área da seção (S) determinados (Figura 4.1).

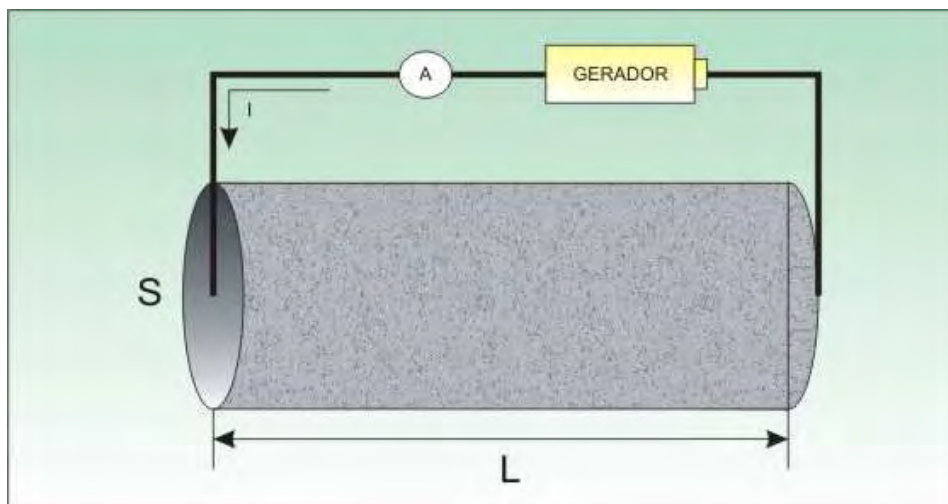


FIGURA 4.1 – Esquema de cilindro condutor ôhmico

A Segunda Lei de Ohm discorre sobre as variáveis que influenciam na determinação do parâmetro físico resistência elétrica para um condutor com dimensões e resistividade conhecidas. A referida lei mostra uma proporcionalidade direta entre a resistência elétrica ( $R$ ) e a resistividade ( $\rho$ ) (Equação 4.1).

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{ohms}) \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde  $\rho$  é a resistividade elétrica do material, que é um parâmetro característico do mesmo. Portanto, se torna possível a determinação do parâmetro físico resistividade ( $\rho$ ) através da Equação 4.2 :

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (\text{ohm.m}) \quad \text{Equação 4.2}$$

O método da eletrresistividade baseia-se na injeção controlada de corrente elétrica no terreno por meio de um circuito tetraeletródico. Este circuito consiste em um par de eletrodos de emissão (A e B), e um par de eletrodos de leitura de potencial elétrico (M e N) (Figura 4.2).

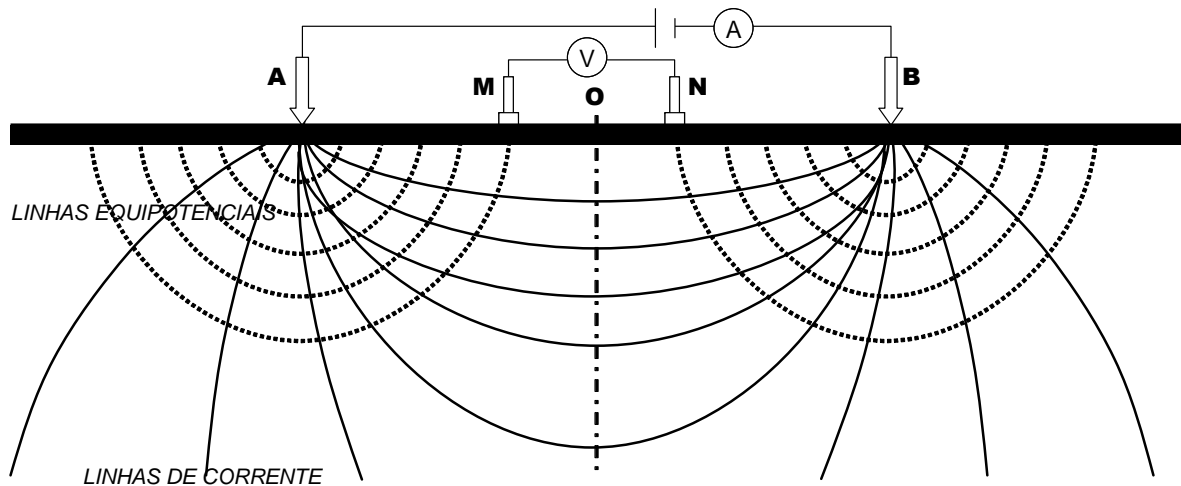


FIGURA 4.2 – Circuito Tetraeletródico (Mod. Braga, 2000)

O campo elétrico resultante da injeção da corrente elétrica gera um potencial que varia inversamente com a distância. Os potenciais são medidos pelos eletrodos M e N, e a diferença de potencial entre eles pode ser demonstrada pela Equação 4.3.

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad \text{Equação 4.3}$$

A disposição dos eletrodos de corrente (A e B) em relação aos eletrodos de potencial (M e N) gera um fator geométrico fundamental na determinação da diferença de potencial medido. Portanto, é definida a constante K (Equação 4.4), que possui dimensões de comprimento e depende unicamente da disposição geométrica dos quatro eletrodos.

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad \text{Equação 4.4}$$

Assim, é possível a determinação do parâmetro físico resistividade elétrica de determinado meio segundo a Equação 4.5.

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Equação 4.5}$$

Conjugando os valores de potencial elétrico medido com a corrente elétrica injetada no terreno, é possível a determinação do parâmetro físico resistividade elétrica no meio geológico.

#### **4.2.2 – POLARIZAÇÃO INDUZIDA**

O desenvolvimento inicial desse método ocorreu em trabalhos que objetivaram a detecção de concentrações de minérios disseminados, essencialmente sulfetos em pesquisas de metais base (VAN VOORHIS *et al.* 1973, SUNMER, 1976).

O método da polarização induzida está baseado na investigação do fenômeno da polarização eletrônica ou de membrana em corpos submetidos à passagem de corrente elétrica, que geralmente ocorre através de um eletrólito que contenha partículas de condução eletrônica, como metais e semicondutores.

A polarização induzida é um fenômeno de indução eletromagnética onde há o estabelecimento de sobretensões que ocorrem após o corte na emissão de corrente, e são geradas pela interrupção brusca no fluxo de partículas portadoras de carga elétrica nos solos, rochas e águas subterrâneas.

O aparecimento de sobretensões em partículas metálicas imersas em um eletrólito é possível pelo acúmulo de íons nas superfícies opostas das mesmas. Nos limites da superfície do corpo ou partícula metálica se estabelecem regiões de fluxo eletrônico e eletrolítico concomitantemente, que geram os acúmulos iônicos, pelas trocas de cargas elétricas entre o corpo ou partícula metálica e o eletrólito. (Figura 4.3).

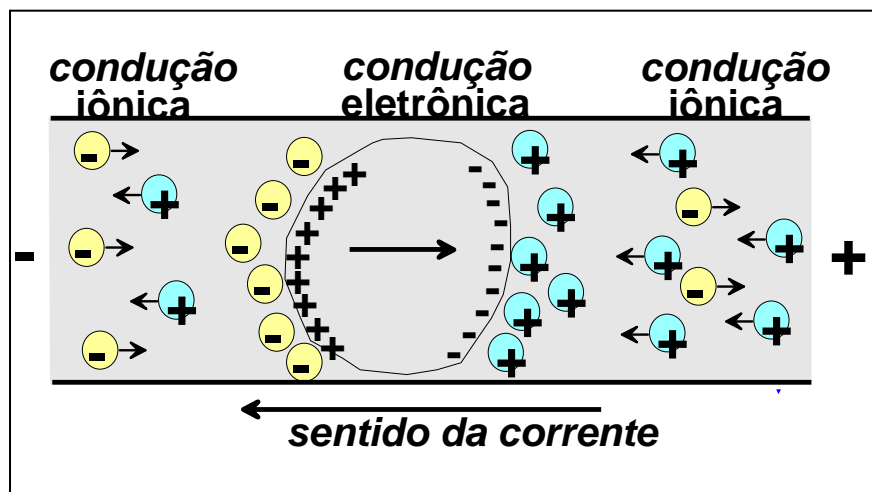


FIGURA 4.3 -Sobretensão de partícula metálica em eletrólito (mod.Orellana, 1974).

A polarização induzida é caracterizada por acúmulo de carga elétrica no material em função de diversos processos dinâmicos, como polarização eletrolítica e polarização de membrana, ou até em função de suas propriedades metálicas.

O fenômeno de polarização eletrônica ocorre em rochas que contenham minerais condutivos disseminados, como sulfetos e metais nativos. Sob efeito de um campo elétrico, este meio será submetido a um fluxo de corrente parcialmente eletrônico e parcialmente eletrolítico.

O contato entre o eletrólito contido nos poros da rocha e o grão mineral metálico, ocorre transferência de íons seja do grão para o eletrólito ou o contrário. O processo resultante da perda de elétrons do grão mineral para o eletrólito é denominado oxidação, enquanto que o ganho de elétrons por parte do grão mineral é conhecido como redução (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966).

A polarização eletrolítica ou de membrana também consiste em um processo de acumulação de íons, seja em pontos de estrangulamento (Figura 4.4) em caminhos de fluxo eletrolítico ou por influência de argilominerais eletricamente carregados (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966; WARD, 1990; TELFORD *et al.* 2004).



FIGURA 4.4 - Compressão do fluxo eletrolítico e polarização por passagem de corrente elétrica (Moreira,2009)

Um mecanismo que afeta a velocidade do fluxo de íons sem impedir sua mobilidade é a presença ao longo dos poros de fragmentos de rocha ou partículas minerais distribuídas, que apresentem capacidade de troca catiônica. Este fenômeno é característico de argilominerais, constituídos de camadas alternadas de ânions e camadas passíveis de retenção ou troca de cátions em solução.

Quando ionizadas, as partículas de argila apresentam aumento de carga, pois a presença de íons imóveis em sua estrutura atrai cátions livres, com impedimento do fluxo iônico nestes locais. Ao campo elétrico natural gerado pelas cargas fixas dos argilominerais, o fluxo de corrente elétrica adiciona um gradiente de potencial, com a criação de áreas com elevação e redução relativas do gradiente de potencial.

O grau de polarização não é diretamente proporcional a capacidade de troca catiônica em rochas com argilominerais (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966). Rochas como argilitos ou folhelhos argilosos apresentam baixa capacidade de polarização em relação à siltitos, que possuem um conteúdo menor de argilominerais. Rochas ricas em argila apresentam grande quantidade de carga negativa fixada nas camadas de troca, restando poucos ânions em solução. Na ausência de ânions livres a capacidade de acúmulo e cargas é pequena.

As medidas de polarização induzida no meio geológico podem ser realizadas por meio de um dispositivo tetraeletródico (Figura 4.2).

O procedimento para medição consiste na injeção de corrente elétrica no subsolo, seguida de corte no envio dessa corrente. A diferença de potencial verificada entre os eletrodos de potencial MN não desaparece bruscamente quando a corrente elétrica é cortada, mas de forma gradual e passível de medição, segundo uma constante de tempo da ordem de dezenas de segundos (ORELLANA, 1974).

A presença de uma tensão residual de polarização indica a presença de condutores eletrônicos dentro da extensão do terreno afetada pela passagem da corrente elétrica.

Essa variação nos potenciais verificados entre os eletrodos MN responde a quantidades normalmente pequenas, que podem ser medidas em função do tempo ou da frequência, originando as classificações seguintes:

- IP-Domínio do Tempo (usado na presente pesquisa)
- IP-Domínio da Frequência.

Na técnica do domínio do tempo as medidas são realizadas após a interrupção do fluxo dos portadores de carga, em corrente contínua, em intervalos de tempo conhecidos. O produto dessa técnica gera curvas características da forma do decaimento do potencial entre os eletrodos MN.

A amplitude de um valor  $\Delta V_{IP}(t)$  está diretamente ligada à variável capacidade de polarização do meio geológico, constituindo-se, portanto, na base desse método geoeletrico. Esta capacidade de polarização constitui a susceptibilidade IP dos materiais da Terra.

Analogamente, pode-se descrever o fenômeno da polarização induzida, como se o solo contivesse condensadores, que se carregariam durante a emissão de corrente, descarregando-se após o corte. A curva  $\Delta V_{IP} = f(t)$  poderia ser definida como a curva de descarga IP (Figura 4.5).

Esta diferença de potencial primária ( $\Delta V/V_p$ ) não se estabelece e nem se anula instantaneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos. Ela varia com o tempo na forma de uma curva  $\Delta V_{IP} = f(t)$ . Esta curva liga a assíntota  $\Delta V/V_p$  em regime estacionário com a assíntota zero após o corte da corrente.

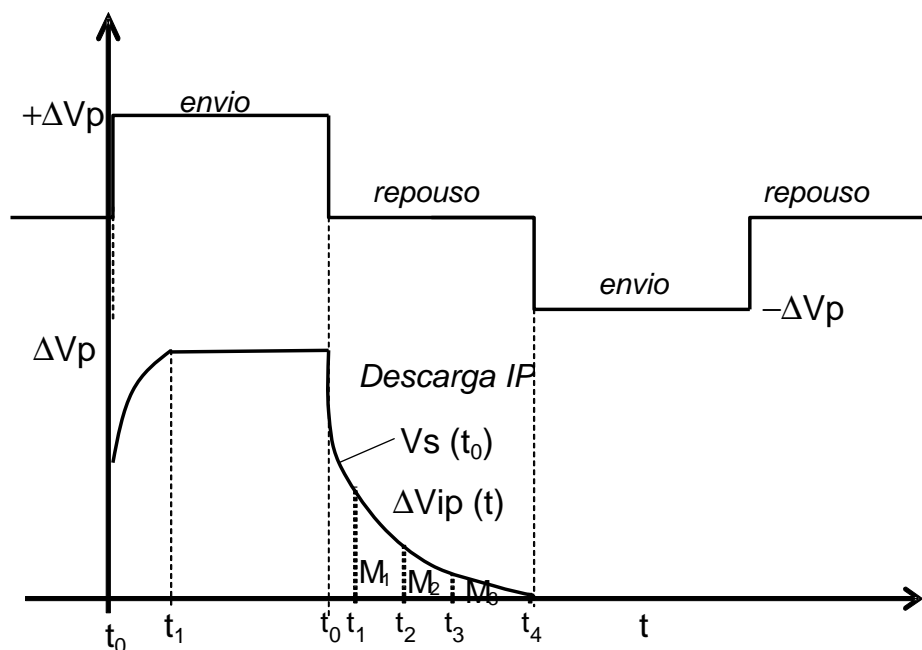


FIGURA 4.5 - Curva de descarga IP-Domínio do Tempo (mod. Braga, 1997)

A determinação dos resultados reflete dados de potencial transiente, como a cargabilidade, que é definida pela variação do potencial transiente entre dois pontos conhecidos da curva de decaimento (TELFORD et al. 1990).

Como a relação entre o potencial transiente e o potencial inicial reflete valores pequenos, a cargabilidade ( $M$ ) é o parâmetro resultante do IP-Domínio do tempo, e pode ser dada em milivolt por volt (mV/V) ou milissegundos (ms).

Se as medições forem efetuadas sobre um terreno homogêneo, todos os valores podem ser definidos como medidas de polarização verdadeiras. Medidas realizadas sobre terrenos heterogêneos terão seus valores condicionados a posição dos eletrodos em relação aos corpos anômalos. Os valores resultantes da investigação do parâmetro cargabilidade elétrica expressam polarizações aparentes, que somente serão medidas reais em terrenos que apresentem homogeneidade em relação aos parâmetros estudados.

#### 4.2.3 – POTENCIAL ESPONTÂNEO

O método do potencial espontâneo investiga fenômenos de polarização provenientes de campos elétricos naturais, sem a necessidade de circuitos elétricos de emissão.



A origem do método data de 1815, o que supõe ao método o título de método geofísico mais antigo. Somente em 1913 ocorreram registros positivos em trabalhos de aplicação do método do potencial espontâneo (ORELLANA, 1972).

A polarização desses corpos cria diferenças nos potenciais elétricos no material componente do subsolo, fazendo com que seja possível o aparecimento de campos elétricos naturais que permitem o surgimento de correntes elétricas. Estas correntes elétricas produzem distribuições de potenciais característicos no terreno, passíveis de medição e que servem de guia na detecção desses corpos.

O fenômeno da polarização espontânea tem suas origens fixadas na eletroquímica, mas os mecanismos relacionados ao surgimento de corpos polarizados são de elevada complexidade em função dos diversos fenômenos físicos e químicos presentes em situações reais.

A literatura aponta divergências sobre as definições dos agentes causadores do fenômeno da polarização espontânea. Mecanismos de oxidação são apontados como causadores desse fenômeno em algumas teorias. Processos dinâmicos mais complexos são apontados por outros estudos que defendem a existência de condições específicas em situações envolvendo a polarização espontânea, como a umidade do subsolo e o nível de acidez associado a águas subterrâneas. Estudos apontam também variações na polarização espontânea entre águas de níveis superiores e inferiores ao nível freático. Os processos mais relevantes para o surgimento desse potencial natural no meio geológico são os seguintes:

- concentração de oxigênio pelos corpos geradores, gerando pilhas
- potenciais de eletro-osmose
- potenciais de difusão
- oxidações ativas
- correntes telúricas
- potenciais de eletrofiltração

Dentre os processos supracitados, os potenciais de eletrofiltração podem ser destacados pela suas magnitudes. O fenômeno que origina estes potenciais consiste na produção de um campo elétrico gerado pelo movimento de eletrólitos (águas subterrâneas) no subsolo.

São conhecidos dois tipos de eletrofiltração: “per ascensum” e “per descensum”. O primeiro tipo se observa em situações onde ocorrem gradientes de

pressão elevados entre os eletrodos, e o deslocamento do eletrólito se dá em sentido ascendente. A eletrofiltração “per ascensum” corresponde à infiltração de águas através de terrenos permeáveis ou ao longo de fraturas ou falhas nas rochas. A água tende a arrastar os cátions, fato que condiciona o aparecimento de anomalias negativas em locais de pouca saturação, e anomalias positivas em locais saturados. Anomalias de potencial espontâneo resultam de variações na temperatura, gradiente de pressão, porosidade, migração de fluidos, variação de resistividade e da umidade do solo.

Segundo Sato e Mooney (1960), os fenômenos de eletrofiltração, difusão e eletro-osmose não podem gerar potenciais elétricos como os verificados pela polarização espontânea, portanto, esses fenômenos agiriam como perturbadores do sistema, e não como fenômenos principais. A associação exclusiva do fenômeno da polarização espontânea a processos de oxidação também é descartada pelos autores.

A polarização espontânea se deve a reações eletroquímicas que possui caráter variável em função da variação de posição da interface entre o corpo anômalo e o meio homogêneo, bem como a ocorrência de águas subterrâneas e a localização do corpo anômalo frente essas águas. As regiões situadas na parte superior do corpo polarizado recebem elétrons do mesmo, caracterizando redução nessas regiões, enquanto as regiões localizadas sob o corpo polarizado doam elétrons ao mesmo, oxidando-se. A origem dos fenômenos associados à polarização espontânea está na diferença de potencial Redox entre as regiões superiores e inferiores do corpo polarizado, que funciona como um meio condutor do fluxo de cargas e condiciona o estabelecimento contínuo das reações químicas envolvidas (SATO & MOONEY, 1960).

O fenômeno da polarização espontânea pode ser causado também através de processos mecânicos, de origem natural, associados a dinâmicas ocorridas no terreno, e principalmente pelo movimento das águas subterrâneas, que se revelam como principais agentes na geração desse fenômeno em estudos ambientais e hidrogeologia.

Os potenciais de difusão são gerados através do contato entre os poros das rochas com eletrólitos distintos, ou quando existem variações nas concentrações de um mesmo eletrólito.

Os íons de sinais opostos assumem movimentos divergentes, o que gera regiões de acúmulo de íons negativos e regiões predominantemente com íons positivos. Com o acúmulo de cargas em regiões predominantes, se estabelece uma diferença de potencial. Estabelecida a condição de equilíbrio, o potencial de difusão (ED) pode ser expresso conforme a Equação 3.6

$$ED = ((RT (I_a - I_c) / nF) \cdot \ln (C1/C2)) \quad \text{Equação 4.6}$$

Onde  $I_c$  e  $I_a$  representam as mobilidades dos cátions e ânions respectivamente,  $n$  é a carga elétrica do íon,  $T$  é a temperatura absoluta envolvida,  $F$  é a constante de Faraday (96.487 Coulombs/mol),  $R$  é a constante universal dos gases (8,314 joules/mol.K) e  $C1$  e  $C2$  representam as concentrações dos eletrólitos geradas pelas difusões ocorridas.

Os potenciais de filtração são gerados por fenômenos denominados eletrofiltração, que consiste na criação de um campo elétrico no subsolo pelo movimento dos eletrólitos, ou seja, as águas subterrâneas.

Com a passagem do eletrólito através de um corpo físico poroso pode produzir uma diferença de potencial entre os lados desse corpo. Nos casos gerais, as rochas ocupam esse papel, pois normalmente apresentam estruturas capilares pelas quais se torna possível a passagem do eletrólito, por sua porosidade ou rede de fraturas.

Nas paredes desses capilares ocorre absorção de ânions que resulta em atração de cátions por princípios das leis da eletricidade, formando recobrimentos elétricos nessas duplas camadas.

Os ânions se fixam enquanto os cátions se tornam móveis pelo eletrólito através do capilar, causando concentrações de carga entre seus extremos.

A variação entre essas concentrações de carga gera uma diferença de potencial  $\Delta V$  e estabelece um campo elétrico  $E_r$  resultante, segundo a Equação 4.7

$$E_r = ((\epsilon\rho\psi) / (4\pi\mu)). P \quad \text{Equação 4.7}$$

Onde  $E_r$  caracteriza o módulo do vetor campo elétrico,  $\epsilon$  é a constante dielétrica do eletrólito ( $F.m^{-1}$ ),  $\rho$  é a resistividade do eletrólito ( $\Omega.m$ ),  $\psi$  é um parâmetro determinado pela capilaridade entre o eletrólito e as paredes do capilar,  $P$

é relacionado a diferença entre as pressões ( $\text{Pa.m}^{-1}$ ) e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do eletrólito ( $\text{Pa.s}$ ).

A diferença de potencial  $\Delta V$  gerada no processo de eletrofiltração pode ser expressa pela equação de Helmholtz, como se segue Equação 4.8

$$\Delta V = ((\zeta \epsilon P) / (\eta \sigma)) \quad \text{Equação 4.8}$$

Onde  $\zeta$  representa a diferença de potencial na dupla camada,  $\epsilon$  é a constante dielétrica do eletrólito ( $\text{F.m}^{-1}$ ),  $P$  é relacionado à diferença entre as pressões ( $\text{Pa.m}^{-1}$ ),  $\eta$  a viscosidade do eletrólito e  $\sigma$  é a condutividade elétrica.

Os potenciais naturais gerados pela geotermia, como as geradas por vulcões, tem como característica fundamental a constância nos potenciais medidos entre os intervalos de maior transferência de calor, ou seja, entre o máximo da manhã e o mínimo do período da tarde.

Segundo Gallas (2005), os ruídos envolvidos na aquisição dos dados nesse método podem ter origem artificial, como ação antrópica, ou natural, como aparecimento de correntes telúricas, desníveis acentuados de topografia, polarização de eletrodos ou deriva.

## 4.3 – TÉCNICAS E ARRANJOS

### 4.3.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os procedimentos para aquisição dos dados em ensaios geoeletricos são diversos, e são adotados em função do tipo de análise necessária para a investigação do meio geológico. As técnicas de investigação geoeletricas podem ser classificadas em três tipos principais: *caminhamentos elétricos -CE*, *perfilagens elétricas -PERF* e *sondagens elétricas verticais - SEV*.

A diferença básica entre essas técnicas consiste no emprego de diferentes procedimentos de campo para se obter o parâmetro físico estudado, ou seja, nos diversos formatos de disposição dos eletrodos na superfície do terreno ou interior de furos de sondagens e a maneira de desenvolvimento dos trabalhos para se obter os

dados de campo, ligada aos objetivos da pesquisa e a geologia local (BRAGA, 1997).

A técnica do caminhamento elétrico - CE realiza investigações laterais dos materiais geológicos em subsuperfície, por meio de eletrodos dispostos na superfície do terreno, que são deslocados horizontalmente de acordo com o arranjo utilizado.

A perfilagem elétrica – PERF é uma técnica utilizada no interior de furos de sondagens mecânicas ou sondas elétricas introduzidas no terreno, com o objetivo de estudar as variações dos parâmetros geoeletricos *in situ*.

A sondagem elétrica vertical - SEV realiza investigações em profundidade dos diferentes tipos e situações geológicas, podendo determinar suas espessuras e parâmetros físicos de interesse a partir de um ponto fixo na superfície de terreno.

Frente aos objetivos de investigação de cada técnica se estabelecem os arranjos de desenvolvimento, que representam a configuração dos eletrodos nos circuitos de emissão e leitura na medição dos parâmetros geoeletricos.

A escolha do arranjo à ser utilizado depende de muitos fatores, dentre elas destacam-se profundidade de penetração, a profundidade de detecção, a resolução vertical e lateral obtida, além das facilidades operacionais.

#### **4.3.2 – CAMINHAMENTO ELÉTRICO**

O objetivo principal dos caminhamentos elétricos é o estudo das variações laterais do parâmetro geoeletrico estudado no subsolo. O procedimento de investigação se dá de maneira horizontal, investigando ao longo de uma seção sua variação, a uma ou mais profundidades determinadas.

Essa técnica é adequada para estudos que investigam contatos geológicos verticais ou inclinados, variações lateral de faces, diques, metalizações e outras estruturas que apresentem heterogeneidades laterais frente aos parâmetros estudados. (ORELLANA, 1972).

Os caminhamentos elétricos são caracterizados por deslocamentos dos pares de eletrodos pela linha de investigação, conservando suas distâncias e posições mútuas, de maneira que o dispositivo é deslocado pela superfície do terreno em conjunto.

O campo elétrico resultante na superfície do terreno se torna variável em função das diferentes posições de locação dos eletrodos de corrente A e B e dos eletrodos de potencial M e N.

Os sucessivos deslocamentos dos dipolos de emissão (AB) e recepção (MN) possibilitam investigações em diferentes níveis, variando com a utilização de diferentes arranjos de eletrodos (Figura 4.6).

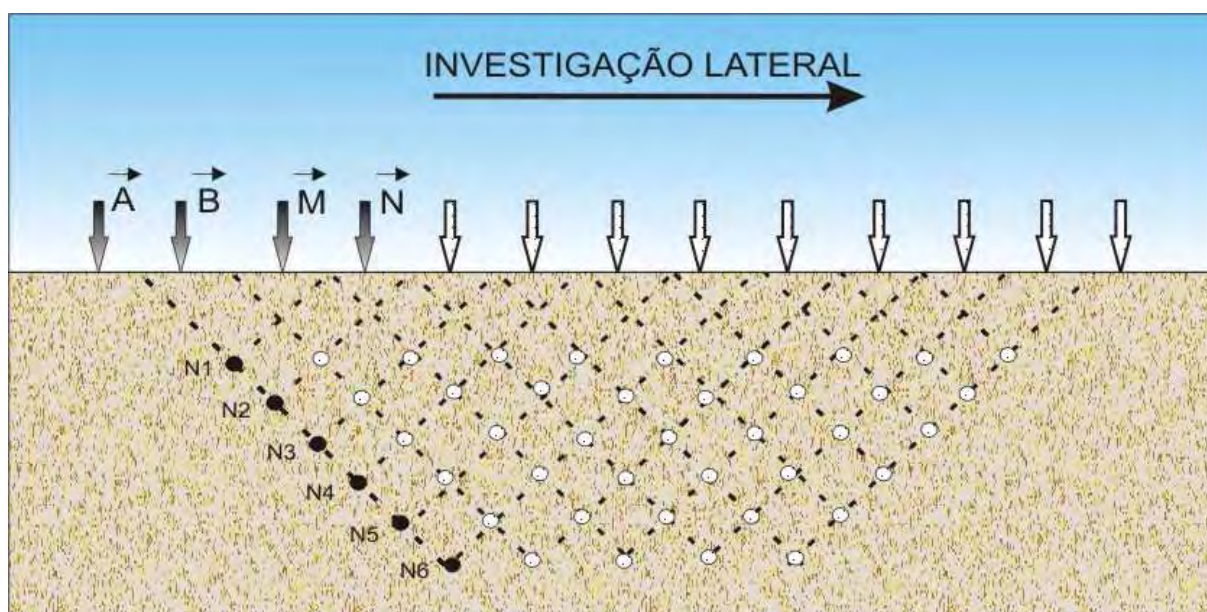


FIGURA 4.6 – Esquema de desenvolvimento do caminhamento elétrico

Os dados provenientes da técnica do caminhamento elétrico podem ser processados em softwares específicos de interpolação e inversão.

No desenvolvimento desta técnica, figuram alguns tipos de arranjos de eletrodos são possíveis de serem utilizados. No presente trabalho adotou-se o arranjo Dipolo-Dipolo - DD, que é empregado em grande escala, em função da precisão e distorção atenuada dos resultados obtidos.

No desenvolvimento desse arranjo de campo, podem-se utilizar simultaneamente vários dipolos de recepção (MN) dispostos ao longo da linha a ser levantada. Cada dipolo MN corresponde a um nível de investigação, podendo, dependendo do caráter do trabalho, estudar as variações horizontais de um parâmetro geológico ao longo de um perfil com um ou mais dipolos, atingindo várias profundidades de investigação.

As medidas dos dados por meio do arranjo Dipolo-Dipolo consistem na execução de uma série de medidas mantendo-se fixo o espaçamento (a) dos dipolos

de emissão (AB) e recepção (MN), aumentando-se a separação entre eles de acordo com um fator “n.a”. Cada uma desses afastamentos corresponde a um nível de investigação em profundidade.

O ensaio é desenvolvido ao longo de perfis previamente estaqueados, com espaçamento constante, em função das profundidades de investigações desejadas, pois tanto o espaçamento entre os dipolos como os números de dipolos utilizados regulam as profundidades de investigações atingidas. Após a disposição do arranjo no terreno, e obterem-se as leituras pertinentes, todo o arranjo é deslocado para a estaca seguinte, continuando este procedimento até final do perfil a ser levantado (Figura4.7).

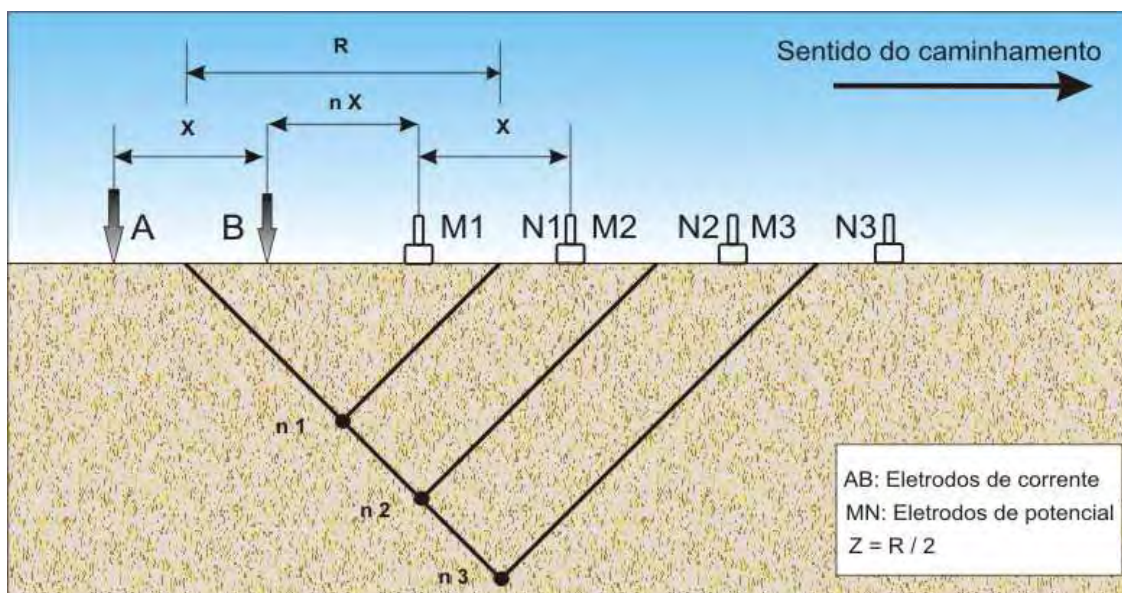


FIGURA 4.7: Arranjo Dipolo-Dipolo

Nesse tipo de arranjo a profundidade teórica atingida em cada nível investigado, é tomada, segundo alguns autores, como sendo  $Z = R/2$  (metros), onde R é a distância entre os centros dos dipolos considerados (AB e MN). Entretanto, na prática, essa relação é mais real se for tomada como sendo aproximadamente R/4 (Braga, 2000).

Quanto maior forem as separações entre os dipolos, maiores profundidades poderão ser alcançadas, tendo como limite de valor aceitável as leituras de potencial superiores ao nível de ruído presentes (GANDOLFO, 2007).

Se as medições forem efetuadas sobre um terreno homogêneo, todos os valores poderiam ser definidos como medidas de resistividade verdadeiras. Medidas realizadas sobre terrenos heterogêneos terão seus valores condicionados a posição

dos eletrodos em relação aos corpos anômalos. Os valores resultantes da investigação em terrenos heterogêneos representam valores aparentes dos parâmetros medidos.

No método da eletrorresistividade, o parâmetro obtido – resistividade aparente – é calculado a partir da Equação 4.9.

$$\rho_a = K \cdot \left( \frac{\Delta V}{I} \right), \quad \text{Equação 4.9}$$

Onde K é definido como um fator geométrico, pois depende exclusivamente da disposição dos eletrodos ABMN na superfície do terreno, e pode ser definido como definido pela Equação 4.10.

$$K = (2\pi) \cdot (G \cdot x) \quad \text{Equação 4.10}$$

Sendo  $x$  o espaçamento dos dipolos AB e MN adotado e  $n$  o nível de investigação correspondente. O parâmetro G depende dos valores associados aos níveis de investigação abordados, e se define como a seguir (Equação 4.11):

$$G = \left( \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \right) \quad \text{Equação 4.11}$$

O sistema de plotagem dos parâmetros geoeletricos obtidos, é efetuado considerando como ponto de atribuição das leituras, uma projeção de 45° a partir dos centros dos dipolos AB e MN, até atingir-se o ponto médio entre os centros destes dipolos.

Após a plotagem de todos os parâmetros geoeletricos obtidos em um perfil levantado tem-se uma seção geoeletrica aparente (pseudo-seções). As pseudo-seções recebem esse nome porque a grandeza representada apresenta valores aparentes, e as profundidades nas quais as medidas são plotadas não correspondem a uma efetiva profundidade de investigação. Desta forma, a escala vertical não tem um significado preciso neste modo gráfico de representação (Figura 4.8).



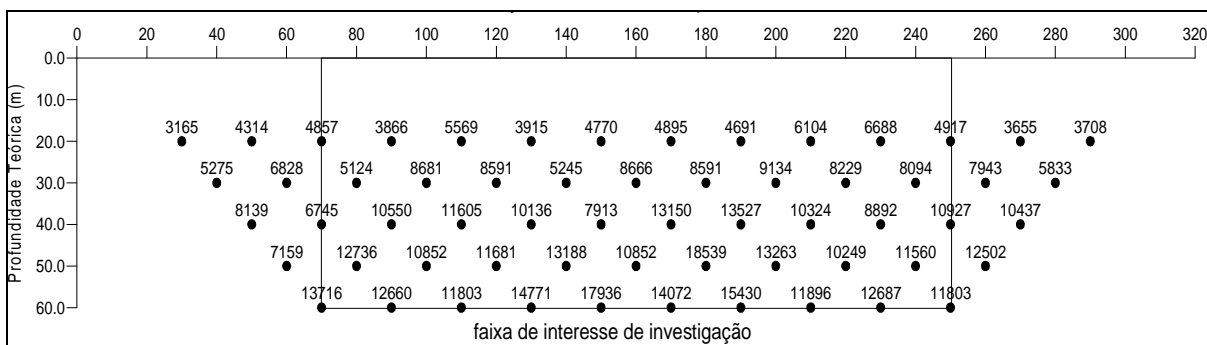


FIGURA 4.8 - Pseudo-seção - CE.

Um aspecto importante das pseudo-seções é relativo ao formato de possíveis anomalias investigadas. Geralmente, a conformação de uma anomalia não guarda correspondência direta com a forma ou dimensão das feições de interesse em subsuperfície, aparecendo de formas distorcidas (GANDOLFO, 2007).

As pseudo-seções do CE-DD podem ser processadas (quantificadas) através da inversão 2D dos dados de campo por softwares adequados.

O arranjo Dipolo-Dipolo (DD) apresenta muitas vantagens de aplicação. A principal delas está no fato de ser um arranjo simétrico, facilitando o correto posicionamento de uma possível anomalia nas pseudo-seções. Outra vantagem em termos práticos é a facilidade operacional desse arranjo. Entretanto, uma desvantagem da utilização do DD é a baixa razão sinal/ruído que ele apresenta, sobretudo quando se torna grande a separação entre os dipolos.

#### 4.3.3 – PERFILAGEM ELÉTRICA

Nesta técnica de campo, a investigação é efetuada no interior de furos de sondagem ou através de sondas instaladas, investigando os materiais *in situ*. Os parâmetros geoeletricos obtidos podem ser considerados reais (Figura 4.9).

Na aquisição de dados dos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida, o arranjo utilizado foi o Wenner. Nesse arranjo os eletrodos são igualmente espaçados de uma distância (a), sendo que os eletrodos de corrente AB são colocados nos extremos e os eletrodos de potencial MN na parte interna, em linha com os primeiros. A profundidade de investigação aumenta com o incremento da abertura entre os eletrodos, sempre múltipla de (a), desta forma as distâncias entre os eletrodos AM, MN e BN são mantidas constantes.

O arranjo Wenner oferece bons resultados no mapeamento de estruturas horizontais, pois é relativamente sensível a variações verticais dos parâmetros geelétricos em subsuperfície, fornecendo uma boa resolução vertical (Figura 4.10).

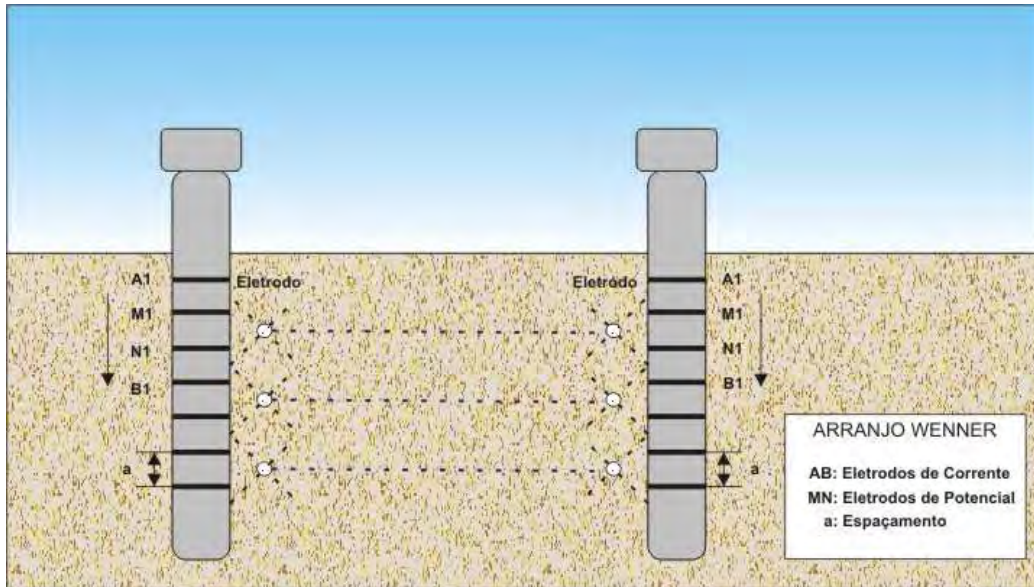


FIGURA 4.10 – Perfilagem elétrica – arranjo Wenner

No entanto, apresenta baixa sensibilidade para variações horizontais desses parâmetros, não possibilitando bom desempenho na definição de estruturas estreitas e verticais. (GANDOLFO, 2007).

Para o método do potencial espontâneo, adotou-se o arranjo de base fixa. Esse arranjo utiliza o eletrodo de potencial M, que é fixado na superfície do terreno enquanto o eletrodo N se desloca ao longo da sonda (Figura 4.11). O ponto de atribuição da leitura é o eletrodo N.

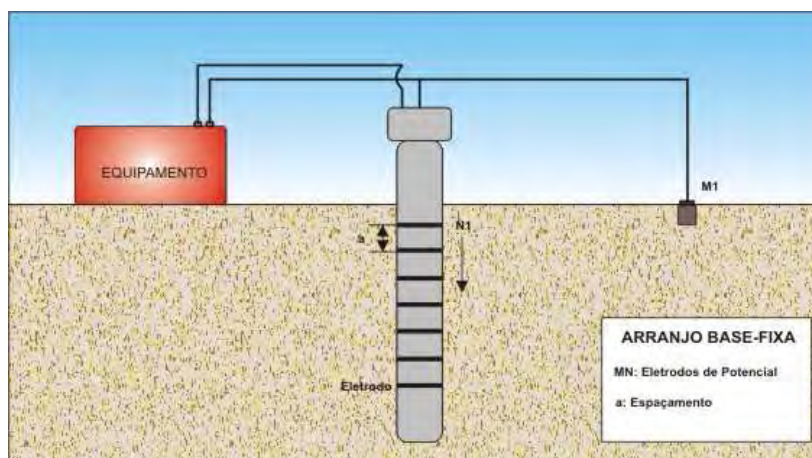


FIGURA 4.11 - Perfilagem elétrica – arranjo de base-fixa

## 5 – AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

### 5.1 – AQUISIÇÃO DOS DADOS

Os ensaios geelétricos foram realizados no tanque de monitoramento, com as seguintes dimensões na parte útil: 2,34 m (comprimento) x 1,34 m (largura) x 0,47 m (altura), os quais foram preenchidos por areia fina comercial, visando uma homogeneidade em termos de granulometria. A espessura total de areia foi de 44,0 cm.

Esses ensaios compõem um monitoramento da contaminação de sedimentos saturados e insaturados por etanol. Foram aplicados os métodos da eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo para a caracterização dos sedimentos contaminados e não-contaminados.

As técnicas utilizadas nas aquisições dos dados foram caminhamento elétrico-CE (arranjo Dipolo-Dipolo) e perfilagem elétrica-PERF (arranjo Wenner) para a eletrorresistividade e polarização induzida, e para o potencial espontâneo foram realizadas perfilagens elétricas, com o arranjo de base-fixa.

A localização dos ensaios geelétricos realizados durante o monitoramento é demonstrada na Figura 5.2, que ilustra os locais onde foram instalados o dispositivo de caminhamento elétrico (CE) e as sondas elétricas (PERF-1 e PERF-2), e as localizações dos poços de controle do nível d'água (P-2 e P-3).

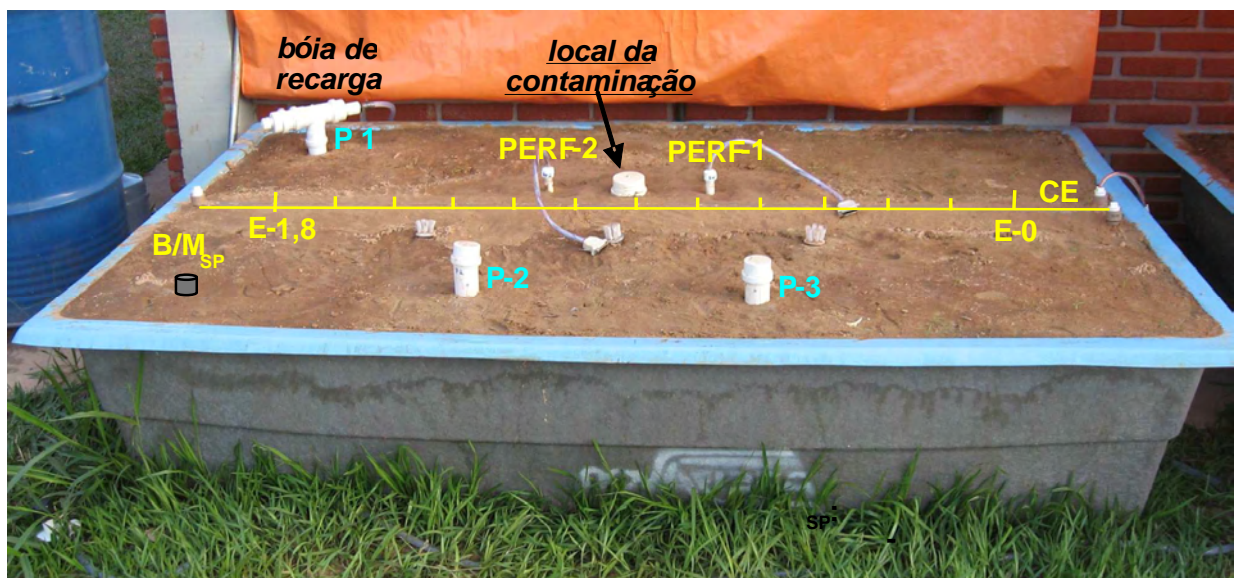


FIGURA 5.2 - Tanque de desenvolvimento da pesquisa

As sondas elétricas e o dispositivo de caminhamento elétrico foram instalados em posições pré-determinadas, com o objetivo de evidenciar a provável pluma de contaminação proveniente da inserção do etanol no tanque de monitoramento.

Os resultados dos ensaios realizados na superfície do terreno refletem a investigação de um perfil central do tanque de monitoramento (Figura 5.3). Esse perfil foi escolhido para investigar os locais predominantemente ocupados pelo contaminante, pois seu ponto de inserção foi locado no centro do tanque.

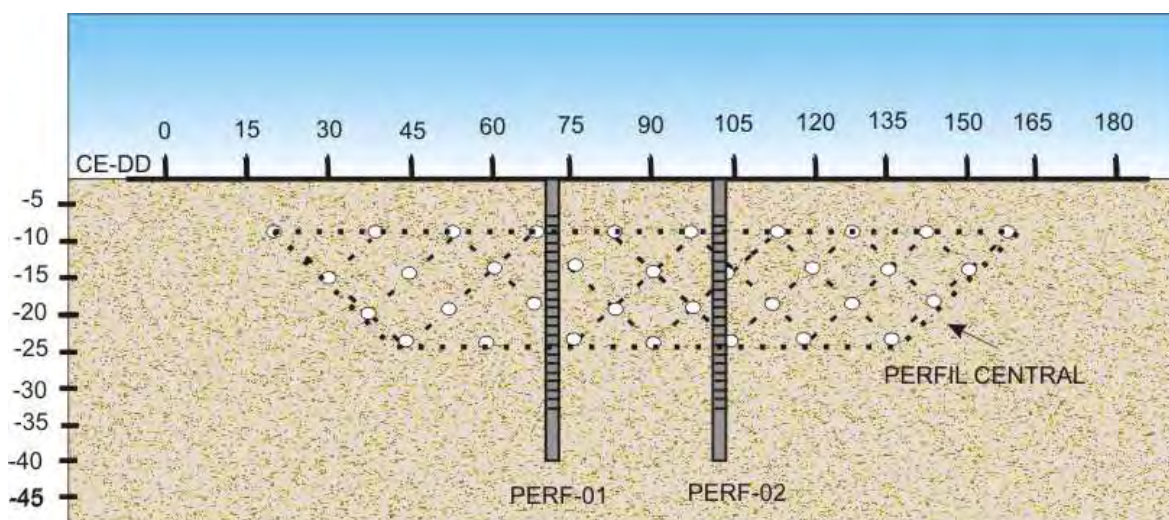


FIGURA 5.3 – Perfil central do tanque de monitoramento

Os dados de caminhamentos elétricos refletem profundidades teóricas de investigação gerando as pseudo-seções referentes ao perfil central do tanque de monitoramento, enquanto que os dados das perfilagens elétricas refletem profundidades de investigação reais.

Foram realizados 25 ensaios geoeletricos nos sedimentos contaminados e não contaminados, destacando-se que no primeiro ensaio foram realizadas medidas nos sedimentos saturados e insaturados não contaminados, frente aos parâmetros geoeletricos: *resistividade, cargabilidade e potencial espontâneo*.

Os ensaios geoeletricos posteriores refletem as alterações nos parâmetros estudados para os sedimentos contaminados por etanol.

Nos ensaios de caminhamento elétrico foram realizadas medidas de resistividade e cargabilidade, por meio do arranjo Dipolo-Dipolo. As perfilagens

elétricas efetuadas realizaram medidas de resistividade elétrica, cargabilidade e voltagem, por meio dos arranjos Wenner (ER, IP) e Base-Fixa (SP).

### 5.1.1 – CAMINHAMENTO ELÉTRICO

O emprego da técnica do caminhamento elétrico na presente pesquisa utilizou o arranjo Dipolo-Dipolo (DD), com espaçamentos entre os dipolos de emissão (AB) e de leitura (MN) de 0,15 metros, com quatro níveis de investigação e extensão total de 1,80 metros.

Os eletrodos utilizados foram de chumbo, pela baixa capacidade de polarização existente nesse metal, e foram pré-fixados em um tubo de PVC (Figura 5.4), condicionando uma constância nos pontos de leitura em todos os ensaios realizados.

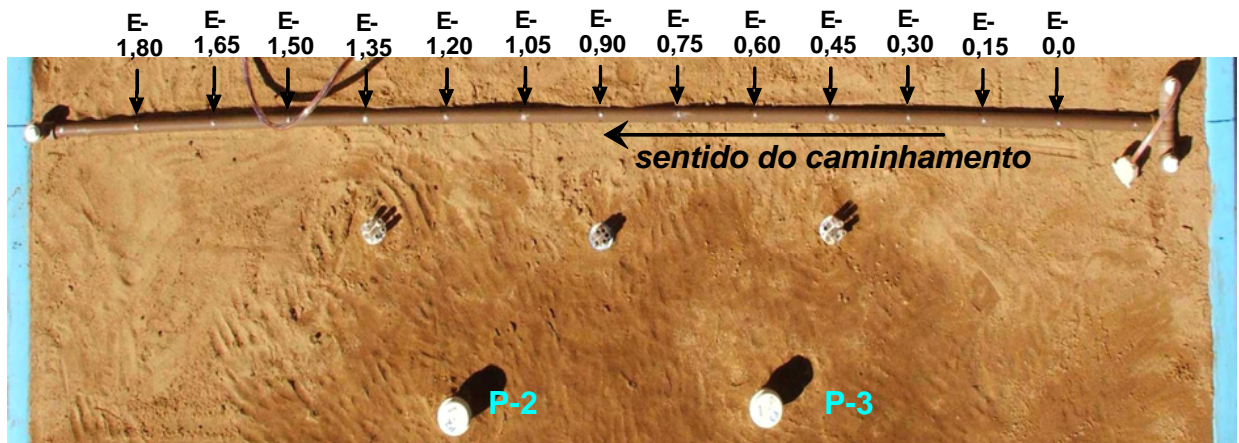


FIGURA 5.4 - Esquema de desenvolvimento dos caminhamentos elétricos

A comunicação entre o dispositivo de caminhamento elétrico e o módulo receptor do equipamento foi efetuada através de cabos elétricos (Foto 5.3). Os cabos elétricos contêm os fios que fazem a conexão elétrica entre o dispositivo e o equipamento.



FOTO 5.3 - Cabos utilizados para a conexão arranjo/equipamento.

### 5.1.2 – PERFILAGEM ELÉTRICA

As perfilagens elétricas foram realizadas por meio de duas sondas elétricas instaladas no tanque de monitoramento.

Nessas sondas existem eletrodos de chumbo, com espaçamento de:  $a = 2,0$  cm entre eles (Figura 5.6). O espaçamento do arranjo utilizado foi de 4,0 cm, com deslocamento do ensaio de 4,0 cm.

A comunicação entre as sondas elétricas e o equipamento foi estabelecida através de cabos elétricos (Foto 5.3). Os cabos elétricos contêm os fios que fazem a conexão elétrica entre o dispositivo e o equipamento.

Para as perfilagens elétricas adotou-se o arranjo Wenner para as medidas de cargabilidade (IP) e o arranjo de base fixa para leituras de voltagem (SP).

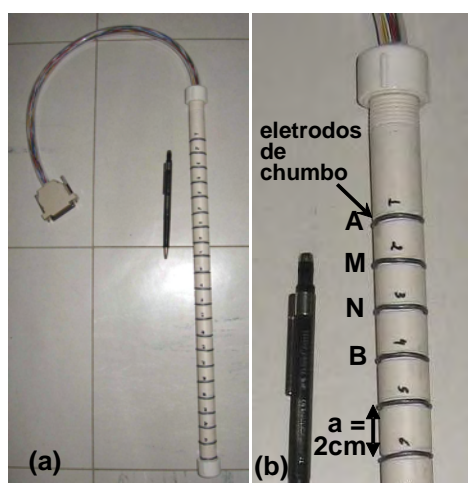


FOTO 5.4 – Sondas Elétricas (perfilagem).

### 5.1.3 – EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado nos ensaios geelétricos foi o resistímetro Terrameter modelo SAS 4000, fabricado pela ABEM (Suécia), que permite leituras de resistividade elétrica, cargabilidade e potencial espontâneo.

Este equipamento pertence ao Laboratório de Geofísica do Departamento de Geologia Aplicada, IGCE/UNESP – Campus de Rio Claro (Foto 5.5). O equipamento apresenta uma potência útil de 100w, e conjuga os circuitos de emissão e recepção em um único módulo, possibilitando a leitura em 4 canais. (ABEM, 2006).



FOTO 5.5 - Equipamento SAS 4000 - ABEM.

O equipamento atende com extrema eficiência as especificações técnicas necessárias nos ensaios geelétricos realizados no modelo controlado. As programações das leituras do resistímetro nos ensaios realizados durante o monitoramento foram estabelecidas como se segue (Tabela 5.2).

TABELA 5.2 – Configurações do equipamento

TÉCNICA	CORRENTE (mA)	ATRASSO INICIAL (ms)	JANELA LEITURA (ms)	CICLO DE AQUISIÇÃO (s)
C.E.-D.D.	10	10	100	2
PERF	2	10	100	2

## 5.2 – PROCESSAMENTO DOS DADOS

O produto do processamento dos dados geofísicos podem ser seções geofísicas, mapas e tabelas. Os dados obtidos na presente pesquisa foram adquiridos por meio das técnicas do caminhamento elétrico e perfilações elétricas, que foram processados de maneira a permitir interpretações e correlações.

Para dados de caminhamento elétrico, a busca por boas resoluções e conseqüentemente imagens de qualidade, tem sido um dos objetivos da geofísica aplicada. A qualidade da resolução (vertical ou horizontal) está intimamente ligada com a densidade de pontos obtidos no levantamento dos dados. Assim, o aumento de resolução estará diretamente relacionado com o aumento da quantidade de pontos na seção, e este incremento, tanto na direção horizontal (investigação lateral) quanto na direção vertical (investigações em profundidade) pode ser obtido de diversas maneiras (GANDOLFO, 2007). Na presente pesquisa foram realizadas medidas de caminhamento elétrico com quatro níveis de investigação, para atenuar as distorções nos dados relativos a profundidades próximas às paredes do tanque de monitoramento e conseqüentes imperfeições nas seções processadas.

Os dados dos caminhamentos elétricos foram tabelados no programa Surfer, versão 8.0, desenvolvido pela *Golden Software Inc.* (Estados Unidos), e processados no programa Res2dinv, desenvolvido pela *Geotomo Software Inc.* (Malásia).

O Res2dinv é um programa que determina um modelo de distribuição bidimensional de subsuperfície, partindo de dados de resistividade e cargabilidade obtidos em ensaios de caminhamento elétrico. O modelo bidimensional considera a pseudo-seção, dividindo-a em blocos retangulares e promovendo um ajuste entre os dados de resistividade e cargabilidade aparentes calculados e os medidos em campo. (LOKE & BARKER, 1996).



## 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados do monitoramento geoeletrico apontam as dinâmicas de variações temporais dos parâmetros resistividade (ER), cargabilidade (IP) e potencial espontâneo (SP) de sedimentos e águas subterrâneas frente a uma contaminação induzida de etanol. A apresentação dos resultados considera essas variações para os sedimentos contaminados, em comparação aos seus valores naturais obtidos no primeiro ensaio realizado, que diz respeito ao comportamento geoeletrico dos sedimentos saturados e insaturados sem a presença do etanol (*background*).

Os resultados obtidos são organizados em três fases temporais, para os parâmetros resistividade (CE-DD e PERF), cargabilidade (CE-DD e PERF) e potencial espontâneo (PERF). Esta separação foi estabelecida pelas análises nos padrões das variações temporais encontradas, que revelam características similares para a faixa saturada e insaturada dos sedimentos.

A primeira fase compreende às 52 horas iniciais da contaminação, onde fica caracterizada a formação da pluma de contaminação de etanol nos sedimentos insaturados e saturados.

A segunda fase da contaminação considera o intervalo de tempo compreendido entre 52 horas e 342 horas após a contaminação.

A terceira fase constitui a fase final do monitoramento, compreendendo os resultados referentes aos ensaios geoeletricos realizados de 342 horas até o final do monitoramento.

A possibilidade de controle sobre os valores dos níveis d'água nos ensaios geoeletricos possibilitou análises dos resultados considerando as variações dos parâmetros medidos sob a influência da água em nível constante. Foram estabelecidos resultados em dois estratos geoeletricos na análise das variações temporais: *saturado e insaturado*.

A determinação dos estratos geoeletricos considera a influência da água nas variações dos parâmetros geoeletricos investigados, portanto adotou-se dois níveis para cada estrato geoeletrico nas análises médias dessas variações.

O estrato geoeletrico insaturado foi investigado em dois nveis: Ni01 (2,6cm) e Ni02 (7,7cm). Essa divisao foi feita tambem para o estrato saturado dos sedimentos, caracterizando os nveis Ns01 (13,1cm) e Ns02 (19,0cm).

Os resultados dos ensaios geoeletricos sao apresentados de forma a evidenciar os padroes de variacao e correlacoes entre parametros encontrados. Os resultados pormenorizados compoem os apendices do presente trabalho (APENDICE A, B e C).

### 6.1.1 – CAMINHAMENTO ELÉTRICO

As escalas de cores e valores nas secoes de resistividade e cargabilidade foram padronizadas para todas as secoes geradas, para facilitar possiveis correlacoes. A secao do ensaio de referencia (ensaio 01) caracteriza as distribuicoes de resistividades e cargabilidades para os sedimentos sem a presenca do contaminante (Figura 6.1).

As resistividades dos sedimentos saturados e insaturados variam entre um intervalo de 65Ω.m e 300Ω.m. As cargabilidades naturais dos sedimentos apresentam faixas constantes de variacao, compreendidas entre 0,5ms e 3,0ms. A secao processada de cargabilidade no ensaio de referencia contem valores negativos em sua escala de cores, mesmo sem apresentar esses valores, em funcao da constancia nas escalas adotada para os ensaios de caminhamento eletrico (Figura 6.1).

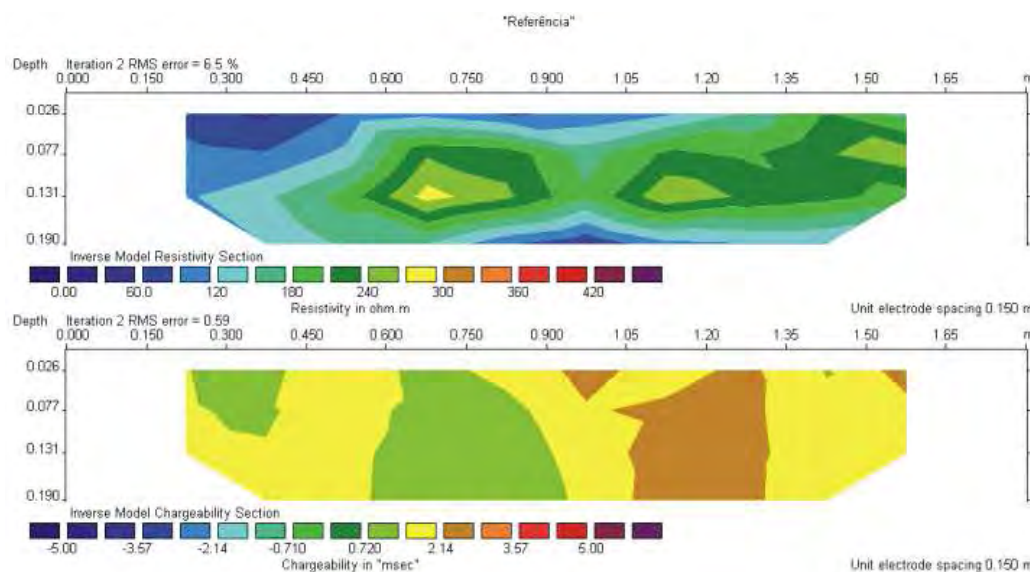


FIGURA 6.1–Ensaio 01 (referência) – resistividade e cargabilidade(NA= 7,0cm)

Há uma anomalia de alta resistividade no centro da seção obtida após 4 horas de injeção de etanol, localizada logo abaixo do ponto de injeção, com valores entre 300Ω.m e 420Ω.m.

Os valores de cargabilidade respectivos a 4 horas após a contaminação revelam a formação de uma faixa constante de cargabilidade associada a região de formação da pluma, de valor próximo a 2ms (Figura 6.2).

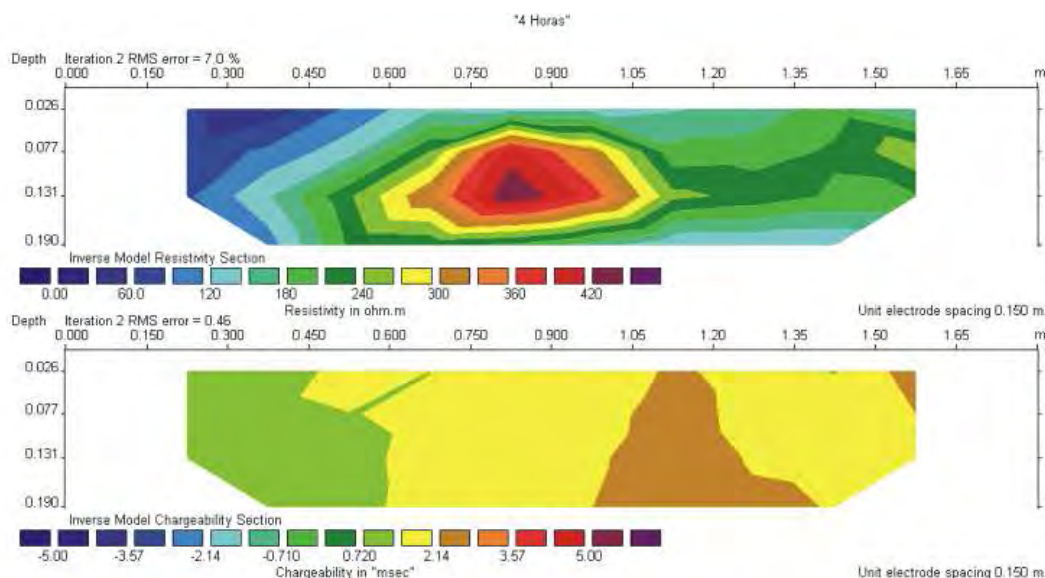


FIGURA 6.2 – Ensaio 02 (4 horas) – resistividade e cargabilidade (NA=6,0cm)

As seções para 28 e 52 horas mostram um aumento do núcleo resistivo (>420Ω.m) , que sugere a percolação do contaminante nos sedimentos.

As distribuições de cargabilidades para os últimos ensaios da primeira fase da contaminação sugerem a manutenção da faixa de 2ms nas porções centrais de tanque, e posteriormente a 12 horas da contaminação, a formação de uma faixa nas proximidades da estaca 1,10m, de cargabilidades na faixa de 4ms.

A segunda fase do monitoramento está compreendida entre 52 horas e 342 horas após a contaminação.

O início da segunda fase do monitoramento apresenta um recuo da anomalia de resistividade revelada pelas seções iniciais do monitoramento. As distribuições de cargabilidade também apresentaram variações durante essa fase.

A seção de resistividade para 78 horas apresenta um recuo da anomalia resistiva (>420Ω.m), constante nas fases sucessivas até 342 horas.

Entretanto, mesmo com a diminuição de resistividades verificadas no início da segunda fase do monitoramento, os valores encontrados eram superiores aos de referência (*background*).

O padrão de diminuição das resistividades para os sedimentos saturados e insaturados foi verificado em 126 horas após a inserção do etanol no tanque de monitoramento.

A partir de 198 horas desaparece a anomalia resistiva inicial ( $>420\Omega.m$ ). Após 342 horas ocorre uma distribuição constante no perfil central estudado, na faixa de  $60\Omega.m$ , atingindo valores inferiores aos verificados na referência.

Essa diminuição pode ser associada a processos de biodegradação do contaminante, conferindo a eles valores de resistividades inferiores aos verificados no início da contaminação.

O padrão de variação de cargabilidade durante a segunda fase do monitoramento é de constante queda, com valores próximos a 0,7ms na porção inferior do perfil, após 342 horas.

A diminuição das cargabilidades nessa fase do monitoramento acompanhou o decréscimo observado nas resistividades para o mesmo período.

As seções posteriores a 342 horas de contaminação compõem a terceira fase do monitoramento.

Entre 342 horas e 1158 horas as distribuições de resistividade apresentaram gradativos aumentos no perfil investigado, de  $60\Omega.m$  a  $150\Omega.m$ .

As seções de cargabilidade apresentam pequenas variações nas faixas de sedimentos próximas as paredes do tanque, de -0,6 ms a 5,0ms. Estas seções apresentam uma pequena variação das cargabilidades relativas as faixas centrais do perfil estudado, variando entre 0,7ms e 2,0ms.

As seções finais de resistividade confirmam o aumento gradativo das resistividades para os sedimentos saturados e insaturados. A partir de 1158 horas da contaminação as seções revelam duas regiões de resistividades levemente superiores nas proximidades das estacas 0,5m e 1,20m dos caminhamentos elétricos. Essas regiões apresentam valores entre  $180\Omega.m$  e  $360\Omega.m$

As seções de cargabilidade do final do monitoramento revelam oscilações entre valores superiores e inferiores aos obtidos no ensaio de referência, variando - 0,6ms e 5,0ms após 1158 horas.

As regiões próximas às paredes do tanque de monitoramento apresentaram as maiores variações. As regiões centrais do perfil investigado-diretamente impactadas pela contaminação, apresentaram faixas de pouca variação, que gradativamente foi assumindo valores crescentes de cargabilidade, variando entre 1,0ms e 3,0ms.

### **6.1.2 – PERFILAGEM ELÉTRICA**

Os resultados das perfilagens elétricas apresentam a variação vertical (investigação em profundidade) dos parâmetros resistividade, cargabilidade e potencial espontâneo obtidos no monitoramento geoeletrico.

As escalas dos eixos foram mantidas constantes em todos os ensaios realizados, de maneira que os resultados dos parâmetros analisados puderam ser comparados entre si e também correlacionados, em função do tempo de monitoramento.

Os resultados de resistividade obtidas no ensaio de referência (ensaio 01) apresentam os valores naturais dos sedimentos saturados e insaturados sem a presença do etanol (Figura 6.3).

Esses resultados mostram valores de resistividade próximos a 200 $\Omega$ .m na faixa insaturada dos sedimentos. Os valores diminuíram em profundidades superiores, variando entre 100 $\Omega$ .m e 180 $\Omega$ .m para os sedimentos saturados, e não contaminados (Figura 6.3- A).

Os valores de resistividade sofreram pequenas variações nas 4 primeiras horas de contaminação, sobretudo na faixa insaturada, que apresentou valores próximos a 360 $\Omega$ .m.

As curvas de resistividade posteriores a 12 horas após a injeção do etanol indicam um aumento considerável nos valores, sobretudo na faixa insaturada dos sedimentos, com valores de até 1750 $\Omega$ .m (Figura 6.3-C). Esse aumento das resistividades é correlacionável à anomalia resistiva verificada na posição central das seções do caminhamento elétrico. As resistividades para a faixa saturada dos sedimentos foi praticamente constante.

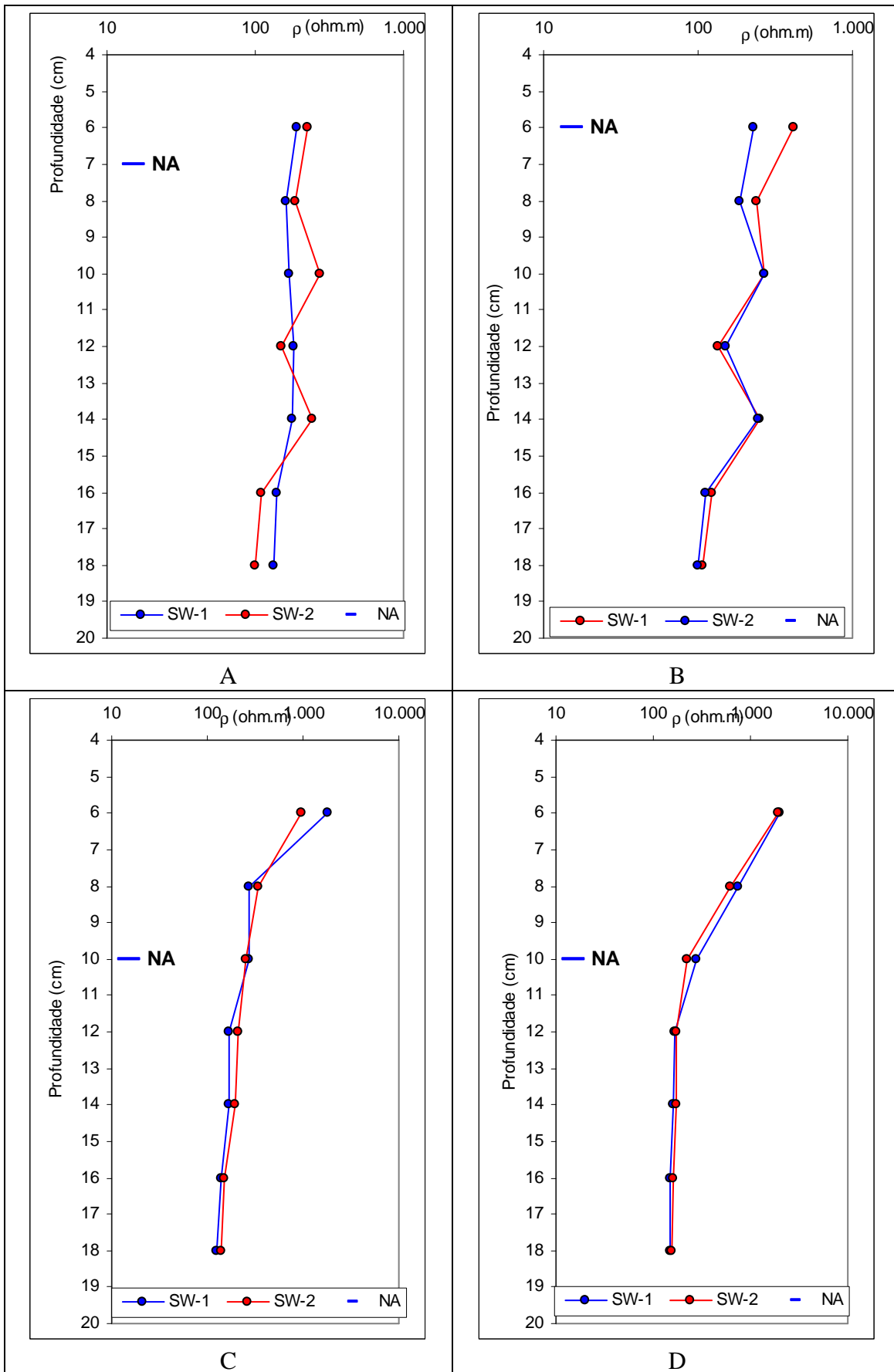
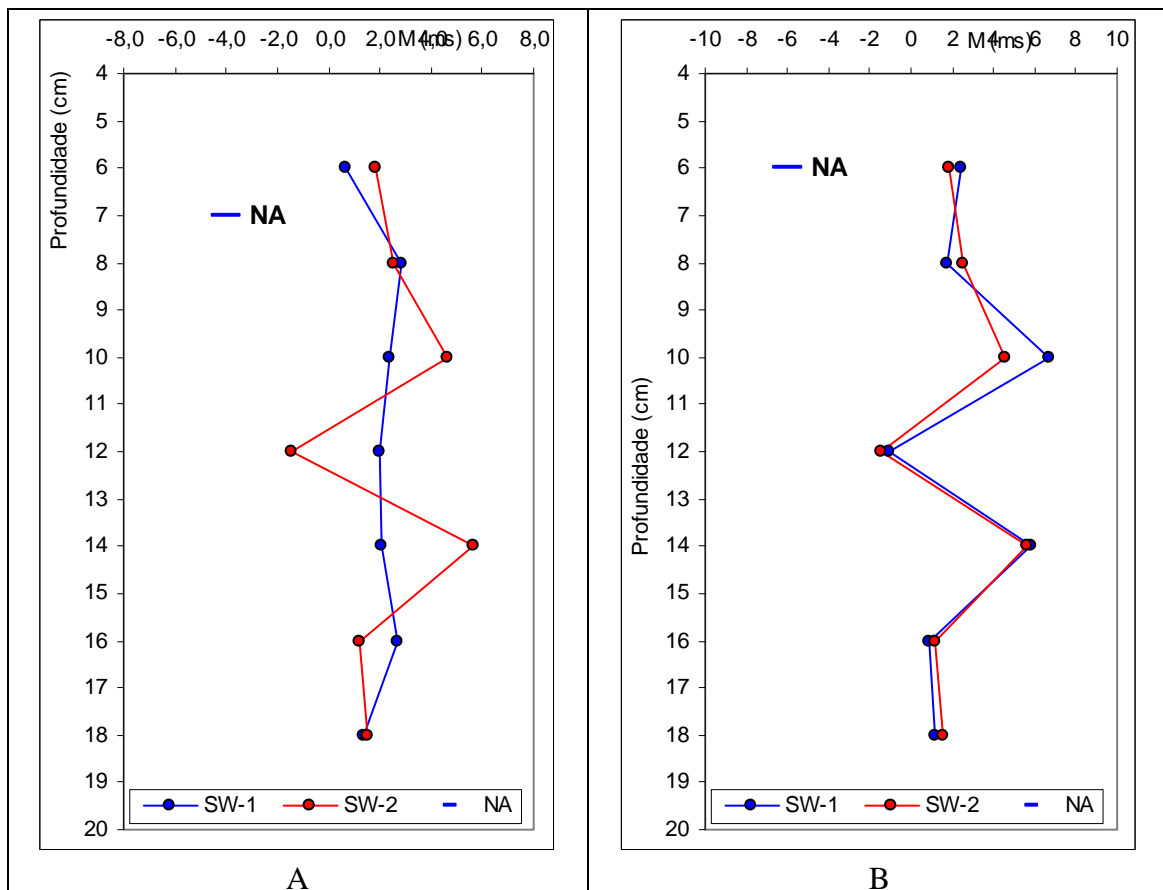


FIGURA 6.3 – Curvas de resistividade. A) Referência, B) 4 horas, C) 12 horas, D) 52 horas.

Ao final da primeira fase do monitoramento os valores de resistividade apresentaram valores próximos a 1900  $\Omega$ .m para os sedimentos acima do NA. Os dados reiteram a tendência de diminuição de resistividades a maiores profundidades, se tornando praticamente constantes quando atinge a faixa saturada dos sedimentos, em torno de 150 $\Omega$ .m.

A curva de cargabilidade referência (ensaio 01) revelam valores de 0,7ms e 2,0 ms para as sondas SW-01 e SW-02, respectivamente para a faixa insaturada dos sedimentos.

Os valores de cargabilidade para os sedimentos saturados apresentaram valores distintos para as duas sondas elétricas, porem esses valores apresentaram as mesmas tendências de variação para a faixa saturada, de valores próximos a 2,0ms (Figura 6.4-A).



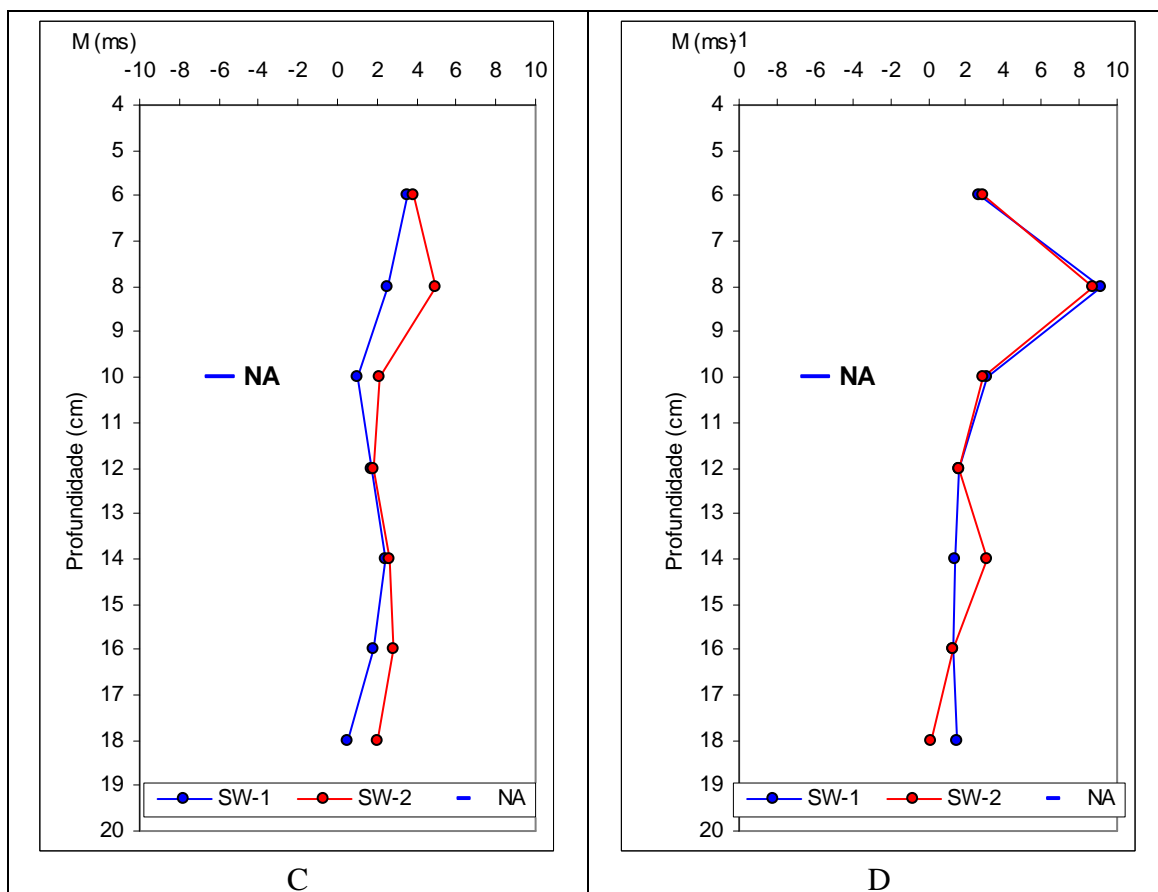


FIGURA 6. 4 – Curvas de cargabilidade. A) Referência, B) 4 horas, C) 12 horas, D) 52 horas.

Após 4 horas de contaminação a cargabilidade apresenta pequeno aumento na faixa insaturada, atingindo 3ms, e constância nos valores relativos à faixa saturada para as duas sondas (Figura 6. 4-B).

As curvas de cargabilidades obtidas em 12 horas e 52 horas apresentam tendências parecidas de variação para os sedimentos saturados e insaturados.

Após 12 horas os valores são próximos de 4,0ms para o topo da faixa insaturada dos sedimentos. Com o aumento da profundidade de investigação sofrem variações, atingindo valores próximos à 5ms e 3 ms no NA (Figura 6. 4-C).

Os resultados relativos às 52 horas após apresentam valores próximos aos verificados após 12 horas de monitoramento, atingindo um pico de cargabilidades altas (9ms) para a faixa insaturada e se estabilizando em valores próximos a 3ms para os sedimentos saturados (Figura 6.4-D).

A cargabilidade aumenta nas faixas insaturadas dos sedimentos nesta fase, e mostraram uma relativa estabilização em torno dos 3ms abaixo do NA.

As curvas de potencial espontâneo (SP) referentes às 52 horas iniciais da contaminação apresentam os comportamentos iniciais do potencial natural dos



sedimentos saturados e insaturados sob a influência do contaminante (etanol) (Figura 6.5).

Após 4 horas de contaminação os valores da superfície dos sedimentos apresentaram valores de 25,0mV e 0,7mV, respectivamente para as sondas PERF-01 e PERF-02.

A faixa insaturada dos sedimentos apresentou aumento nos valores de potencial espontâneo (112,0mV e 36,0mV) seguidos de decréscimo desses valores nas proximidades do NA (23,0mV e -21,9mV) (Figura 6.5-A).

Os sedimentos saturados apresentaram valores de SP convergentes para as duas sondas. Esses valores apresentaram pequenas variações sob a influência da água, apresentando valores médios de -8,0mV (Figura 6.5-A).

As curvas de SP posteriores a que compreendem as 52 horas após a contaminação apontam valores correlatos para os sedimentos saturados e insaturados.

Os padrões de variações dessas curvas sugerem o estabelecimento de diferenças nos valores obtidos pelas sondas acima do nível d'água, e posterior convergência desses valores nas proximidades do NA (Figuras 6.5-B, C, D).

As curvas obtidas após 28 horas e 52 horas após a contaminação revelam similaridades nos valores respectivos de SP para cada ensaio.

Os valores da superfície dos sedimentos apresentam valores distintos para as sondas, com valores negativos na SW-02 e positivos na SW-01. Os valores apresentam aumentos na faixa saturada e convergem seus valores para nas proximidades do NA, próximos a -25mV (Figuras 6.5-C,D).

As médias dos valores de SP para as faixa do NA para 28 horas e 52 horas foi 60mV e 90mV, respectivamente.

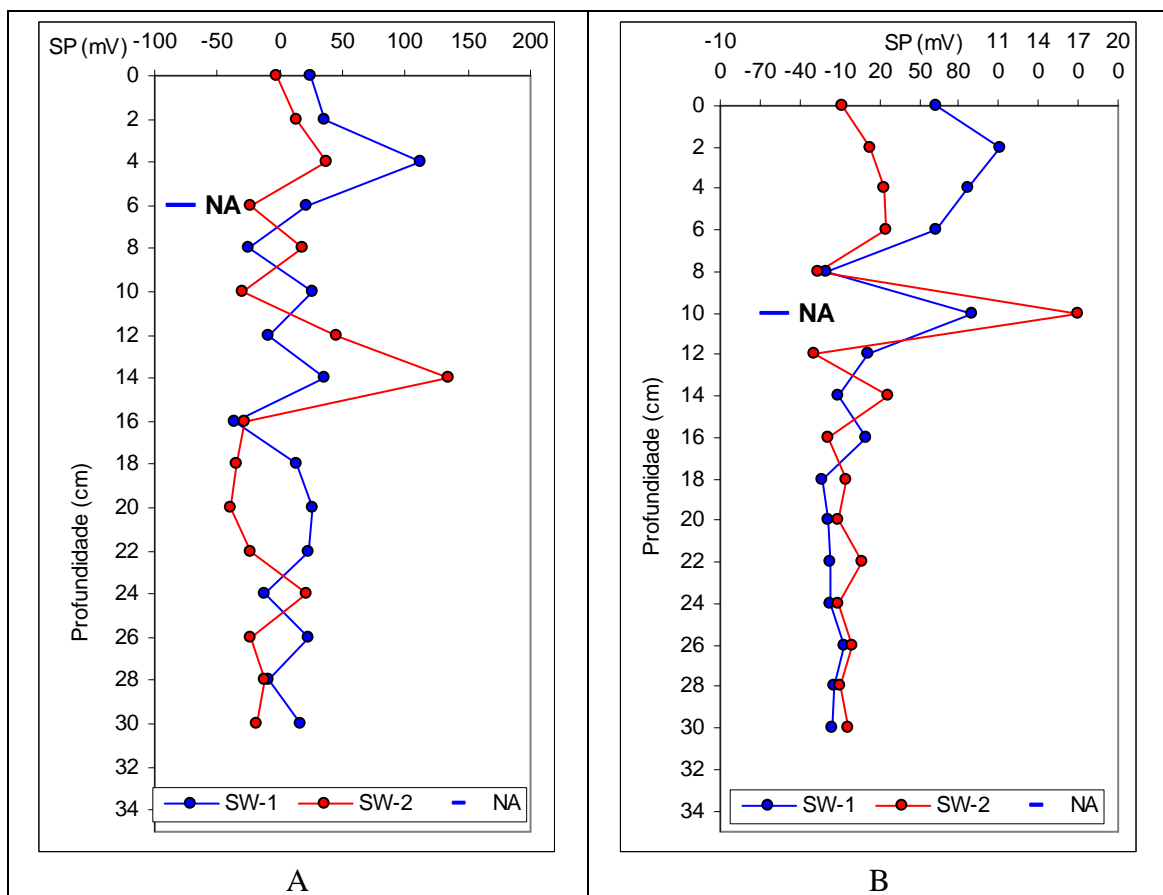
As curvas apontam um decréscimo nos valores desse parâmetro no topo da faixa saturada dos sedimentos, para valores próximos de -40mv, seguido por um leve aumento e posterior estabilização em -12,0mV (Figuras 6.5-B,C).

A segunda fase do monitoramento, entre 52 horas e 342 horas após a contaminação revela tendências de diminuição das resistividades na faixa insaturada dos sedimentos, sobretudo nos horizontes superiores dessa faixa.

Após 78 horas da contaminação os valores de resistividades verificadas nos horizontes superiores da faixa insaturada dos sedimentos são próximos de

1.600Ω.m. Esses valores apresentam decréscimos com o aumento da profundidade, estabilizando-se nas proximidades de 100Ω.m na faixa saturada dos sedimentos.

Nas curvas de resistividades obtidas após 102 horas de contaminação, os valores para a porção insaturada dos sedimentos são próximos de 1500Ω.m, seguida de decréscimos em seus valores com o aumento da profundidade e aproximação do NA. Na faixa saturada dos sedimentos as curvas revelam relativas estabilidades nas resistividades em torno de 100Ω.m.



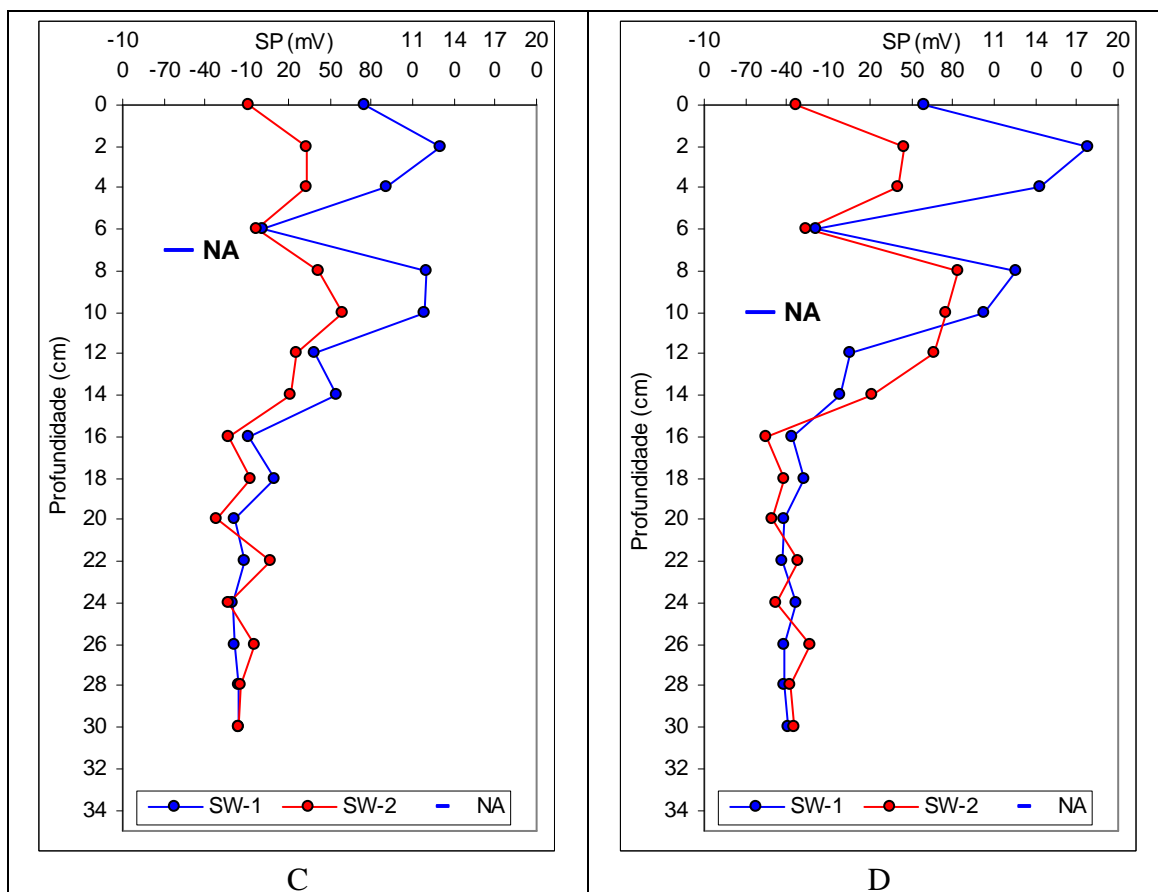


FIGURA 6. 5– Curvas de potencial espontâneo. A) 4 horas, B) 12 horas, C) 28 horas, D) 52 horas.

Os resultados do ensaio realizado 126 horas após a presença do contaminante apresenta significativas diminuições nas resistividades para a faixa insaturada, atingindo valores inferiores a  $800\Omega.m$  nas duas sondas elétricas. Entretanto, a faixa saturada dos sedimentos não apresenta tais decréscimos, revelando valores próximos de  $100\Omega.m$ , assim como verificado no início da segunda fase do monitoramento para essa faixa dos sedimentos.

O final da segunda fase do monitoramento reafirma a tendência de diminuição nas resistividades medidas para os sedimentos insaturados, sobretudo nos horizontes superiores dessa faixa, seguida de relativas estabilizações desses valores em torno de  $100\Omega.m$ . Após 342 horas da realização da contaminação, as resistividades medidas para o topo da faixa insaturada dos sedimentos atinge  $120\Omega.m$ , revelando quedas bruscas desses valores em relação ao início da segunda fase do monitoramento, para essas profundidades de investigação. O final da segunda fase do monitoramento apresenta valores de resistividades para os

sedimentos saturados praticamente equivalentes aos verificados no início dessa fase, com valores próximos à  $100\Omega.m$ .

As curvas de cargabilidade dos ensaios realizados no início da segunda fase do monitoramento revelam valores em torno de 3,5ms para os sedimentos insaturados, seguidos de aumentos à profundidades maiores, atingindo valores próximos de 6ms e posteriores quedas à nas adjacências dos níveis d'água. As respectivas cargabilidades da faixa saturada dos sedimentos, para o início da segunda fase do monitoramento, revela relativas estabilizações desse parâmetro em torno de 2ms.

As curvas relativas ao final da segunda fase do monitoramento apresentam valores equivalentes de cargabilidades para as duas faixas dos sedimentos aos verificados no início dessa mesma fase, com valores maiores desse parâmetro para a faixa insaturada (até 6ms) e relativa estabilização em torno de 2ms para a faixa saturada dos sedimentos. Para as resistividades, essa fase (52hrs a 342hrs) apresenta valores elevados ( $>1000\Omega.m$ ) para os sedimentos, seguida de quedas, atingindo resistividades menores que as medidas no ensaio de referência.

As curvas de potencial espontâneo da segunda fase do monitoramento revelam grandes oscilações nesse parâmetro para os sedimentos insaturados. Após 76 horas da contaminação os valores do topo da faixa insaturada revelam valores de 50mV, seguido de aumento nesse valores para 140mV e posteriores decréscimos nas proximidades do nível d'água para -40mV. O topo da faixa saturada dos sedimentos apresenta valores de potencial espontâneo de 75mV, seguidos de diminuição e relativa estabilidade nos horizontes inferiores dessa faixa, para valores próximos de -50mV. Os padrões de potencial espontâneo encontrados no final da segunda fase do monitoramento se equivalem aos verificados no início dessa fase.

Após 342 horas da contaminação os valores do horizonte superior da faixa insaturada dos sedimentos revela valores médios de 50mV. As oscilações verificadas para esse parâmetro nessa faixa dos sedimentos, no início da segunda fase do monitoramento, são equivalentes aos verificados no final dessa mesma fase (342 horas).

Após 342 horas da contaminação os sedimentos saturados apresentam valores de 50mV no topo da faixa saturada dos sedimentos, seguida de relativa estabilização para horizontes inferiores dos sedimentos saturados, nas proximidades de -40mV.

O início da terceira fase do monitoramento (após 342 horas) revela valores de resistividades menores que os medidos no ensaio de referência para a faixa saturada e insaturada dos sedimentos.

Após 510 horas da contaminação as curvas apresentam valores próximos de  $60\Omega.m$  para a faixa insaturada dos sedimentos. Com o aumento da profundidade de investigação as resistividades apresentam variações relativamente pequenas, com decréscimo no topo da faixa saturada dos sedimentos ( $46\Omega.m$ ) seguida de leves aumentos nos horizontes inferiores dessa faixa ( $90\Omega.m$ ).

As curvas de resistividades obtidas após 1038 horas da contaminação apresentam perfis equivalentes aos observados no início da terceira fase do monitoramento. Os valores da faixa insaturada dos sedimentos revelam resistividades próximas de  $90\Omega.m$ , seguida de pequenos decréscimos com o aumento da profundidade. A faixa saturada dos sedimentos demonstram valores de  $80\Omega.m$  nos horizontes superiores e posteriores aumentos nos horizontes inferiores.

O final da terceira fase do monitoramento apresenta gradativos e pequenos aumentos nas resistividades medidas com valores que se aproximam dos obtidos no ensaio de referência. Após 1590 horas de monitoramento as resistividades da faixa insaturada dos sedimentos são próximos de  $125\Omega.m$ . A faixa insaturada para essa perfilagem revela valores de  $108\Omega.m$  nos horizontes superiores com relativa estabilidade para os valores dos horizontes inferiores dessa faixa dos sedimentos, em torno de  $72\Omega.m$ .

Após 2742 horas da contaminação as curvas de resistividades mostram valores superiores aos obtidos no início da terceira fase do monitoramento, para a faixa saturada e insaturada dos sedimentos. Entretanto, esses valores ainda são inferiores aos obtidos para os sedimentos sem o contaminante. A faixa insaturada apresenta valores de  $200\Omega.m$ , enquanto os sedimentos saturados revelam valores próximos de  $120\Omega.m$ .

As curvas de cargabilidades da terceira fase do monitoramento (após 342 horas) revelam variações relativamente aleatórias em seus valores. Entretanto, os valores médios apresentam relativa constância e as cargabilidades associadas à sonda PERF-02 normalmente revelam valores superiores aos verificados na sonda PERF-01.

Após 1158 horas da contaminação as curvas de cargabilidades apontam valores próximos de  $2,5ms$  para a faixa insaturada dos sedimentos. Com o aumento

das profundidades esses valores apresentaram variações pequenas. A faixa saturada dos sedimentos revela cargas que oscilam em torno de 3,0ms.

Os valores de cargas obtidos após 2406 horas da presença do etanol apontam 2,0ms para a faixa insaturada dos sedimentos. Com o aumento das profundidades esses valores apresentam pequenas variações, atingindo valores médios de 0,5ms para a faixa saturada dos sedimentos.

As curvas de potencial espontâneo da terceira fase do monitoramento revelam claramente a influência do nível d'água nos valores obtidos para esse parâmetro. As perfilações realizadas nessa fase apontam bruscas variações dos potenciais espontâneos na faixa insaturada dos sedimentos, seguida de uma clara influência dos níveis de saturação no sentido de estabilizar os valores desse parâmetro na faixa saturada dos sedimentos.

Após 1158 horas da contaminação as curvas de potencial espontâneo apresentam valores oscilantes para a faixa insaturada, com valores médios de 22mV topo dessa faixa dos sedimentos. As variações nessas curvas se revelam entre 10mV a -50mV. A faixa saturada dos sedimentos apresenta uma nítida estabilidade desse parâmetro em valores próximos de -70mV.

Os valores obtidos após 2406 horas da presença do contaminante revelam os mesmos padrões de variação desse parâmetro na faixa saturada e insaturada. Os sedimentos insaturados revelam variações médias entre 140mV e -40mV. A faixa saturada dos sedimentos aponta valores relativamente constantes de SP, em torno de -70mV.

## **6.2 – DISCUSSÕES**

Os resultados apontam influência do NA nos resultados que compõem esse estudo, sugerindo que a água influenciou nas distribuições dos parâmetros resistividade, carga e potencial espontâneo nos sedimentos, antes e após a presença do contaminante.

A análise das variações temporais dos parâmetros resistividade, carga e potencial espontâneo foram, portanto, realizadas nesses dois estratos geoeletricos.

As profundidades investigadas, em ordem crescente dos níveis foram 2,6cm, 7,7cm, 13,1cm e 19,0cm. Os valores dos níveis d'água dos ensaios realizados foram registrados por meio dos poços P-01 e P-02, e seus valores indicam um valor médio de 10,6cm para os caminhamentos elétricos.

A variação dos parâmetros resistividade e cargabilidade para o estrato insaturado dos sedimentos inicialmente foi realizada de maneira independente. Posteriormente, foram gerados gráficos que consideram as correlações temporais dessas variações para os dois parâmetros.

As curvas de variação temporal da resistividade para o estrato geolétrico insaturado apresentaram alterações bruscas em seus valores durante as horas iniciais após a contaminação (Figura 6.6).

A curva de variações para o primeiro nível do estrato geolétrico insaturado (2,6cm) apresenta um valor inicial (*background*) de 140Ω.m para os sedimentos secos. Após a injeção do etanol a resistividade apresenta um aumento significativo, atingindo um pico de 930Ω.m após 52 horas da contaminação (Figura 6.6).

Após 52 horas ocorre um decréscimo brusco dos valores para 50 Ω.m, registrado 198 horas (Figura 6.6). Os resultados apontam um suave a gradativo aumento nas resistividades para os sedimentos secos, apresentando tendências de retorno aos valores verificados no ensaio de referência (Figura 6.6).

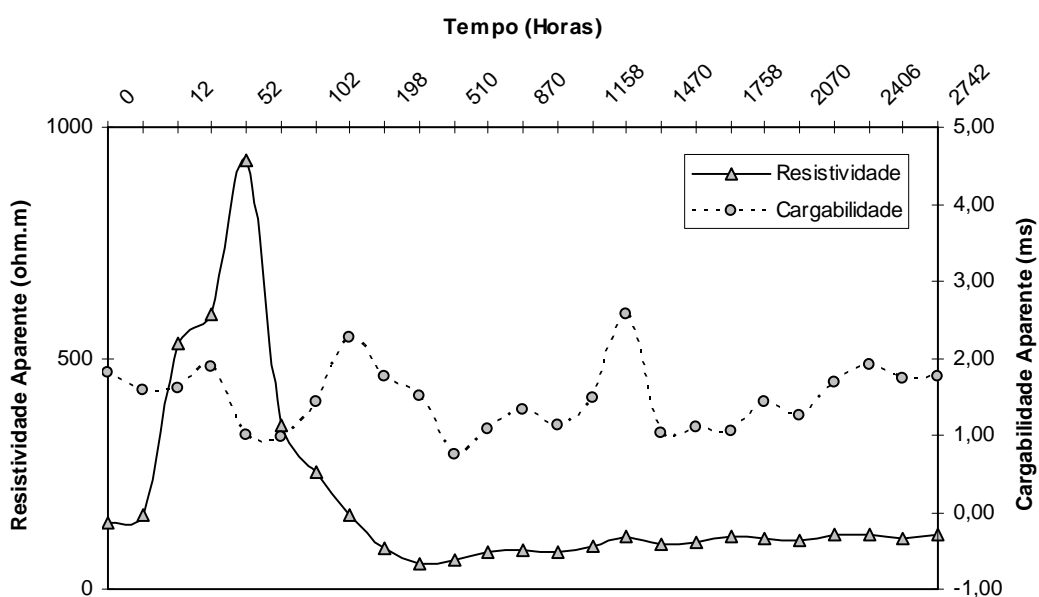


FIGURA 6.6 – Curvas integradas de variação - Ni01 (2,6cm)

Foram geradas curvas de variação temporal de cargabilidade para os dois níveis do estrato insaturado, visando correlacionar com a resistividade.

O período inicial da influência do etanol nos sedimentos não ocasionou variações equivalentes para as cargabilidades associadas para esse estrato geoeletrico.

As cargabilidades respectivas aos níveis do estrato geoeletrico insaturado apresentam oscilações em seus valores nas horas iniciais da contaminação, porém essas variações também são verificadas no decorrer do monitoramento, tornando os padrões de variação desse parâmetro insuficientes para caracterizar a presença do etanol.

A correlação entre a resistividade e cargabilidade revela que os agentes causadores das variações das resistividades não determinaram um perfil análogo nas variações de cargabilidade.

As curvas de variação dos parâmetros resistividade e cargabilidade para o estrato geoeletrico saturado revelam a influência do contaminante, bem como sua dinâmica de variação temporal para os sedimentos sob a influência da água.

Os padrões de resistividade para o estrato geoeletrico saturado acompanharam as tendências verificadas para o estrato geoeletrico insaturado.

A resistividade apresenta um aumento significativo em seus valores nas horas iniciais após a injeção de etanol.

Os valores de resistividade para o estrato geoeletrico saturado revelam o caráter resistivo do etanol em suas fases iniciais, atingindo os valores máximos após 12 horas, seguido por uma queda para valores inferiores aos verificados no ensaio de referência, com os mínimos verificados após 198 horas (Figuras 6.7).

Entretanto as variações nas resistividades verificadas nos dois níveis do estrato geoeletrico insaturado apresentaram amplitudes menores que as verificadas para o estrato geoeletrico insaturado.

Essa menor alteração de resistividades para o estrato saturado pode ser associada à elevada miscibilidade entre etanol e água, que atenua o caráter verificado no estrato insaturado.



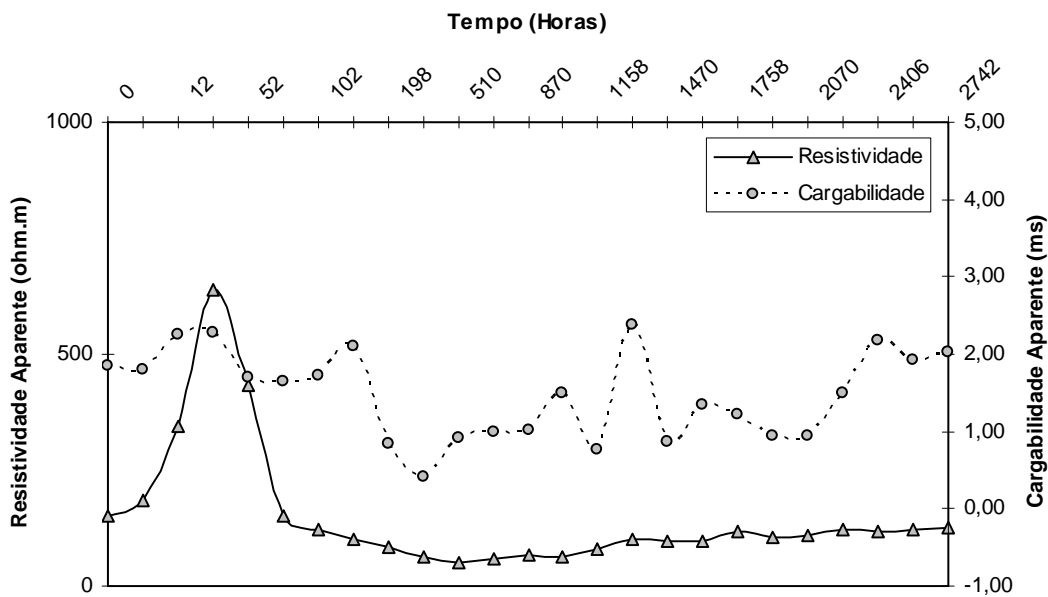


FIGURA 6.7 – Curvas integradas de variação – Ns01 (13,1cm)

As variações de cargabilidades encontradas para o estrato saturado não apresentam similaridades com as tendências verificadas para as resistividades do mesmo estrato.

O padrão de variação de cargabilidade apresenta variações que podem ser relacionadas para os dois níveis do estrato geoeletrico saturado. Contudo, o segundo nível (19,0cm) apresenta maiores amplitudes de oscilação, sugerindo maior influência da água na solução formada entre etanol e água.

Após 198 horas e 1590 horas ocorrem diminuições bruscas nos valores de cargabilidades associadas ao estrato saturado, e estas representam os menores valores do monitoramento.

Após 148 horas ocorrem os valores mínimos de resistividade para os dois estratos geoeletricos.

È possível a correlação desses eventos com instante de tempo em que o contaminante se misturou completamente com a água que saturava o tanque de monitoramento, ou a influência de águas de chuva que porventura infiltraram nos sedimentos, alterando a hidrogeoquímica do local.

A integração das curvas de resistividades obtidas para os quatro níveis investigados confirmam as tendências verificadas de aumento inicial dos valores. Posteriormente, esses aumentos são seguidos um brusco declínio das resistividades

até as 52 horas iniciais da contaminação, indicando a efetiva influência do etanol nessas variações (Figura 6.8).

Os valores mínimos de resistividade foram verificados após 198 horas de contaminação para todos os dois estratos geoeletricos, definindo um intervalo médio de 146 horas de decréscimos das resistividades, até seus valores mínimos.

Os padrões das variações de resistividade nos dois estratos revelam aumentos nesses valores após 198 horas da contaminação, com gradativa aproximação dos valores naturais. Esse comportamento pode ter sido resultado da total miscibilidade do contaminante com a água do experimento (Figura 6.8).

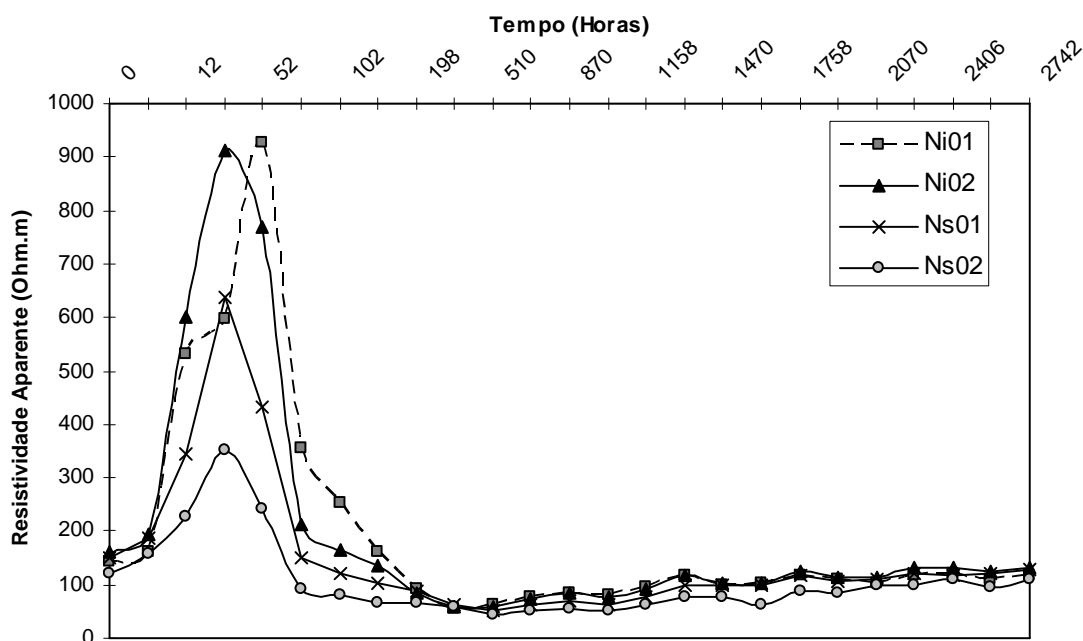


FIGURA 6.8 – Curvas integradas de resistividades

As curvas de integração de cargabilidades para os dois estratos geoeletricos apresentam oscilações durante todo o monitoramento. Entretanto, em torno de 198 horas essas variações assumem grande amplitude (Figura 6.9).

As oscilações do padrão de variação de cargabilidade foi maior para o último nível do estrato saturado (19cm), sugerindo distorções mais bruscas nas regiões próximas ao fundo do tanque.

A cargabilidade atinge valores mínimos em 198 horas de monitoramento, padrão análogo ao verificado para as resistividades no estrato saturado e

insaturado. Esta tendência pode estar associada à influência de fatores externos, como entrada de água de chuva no tanque de monitoramento.

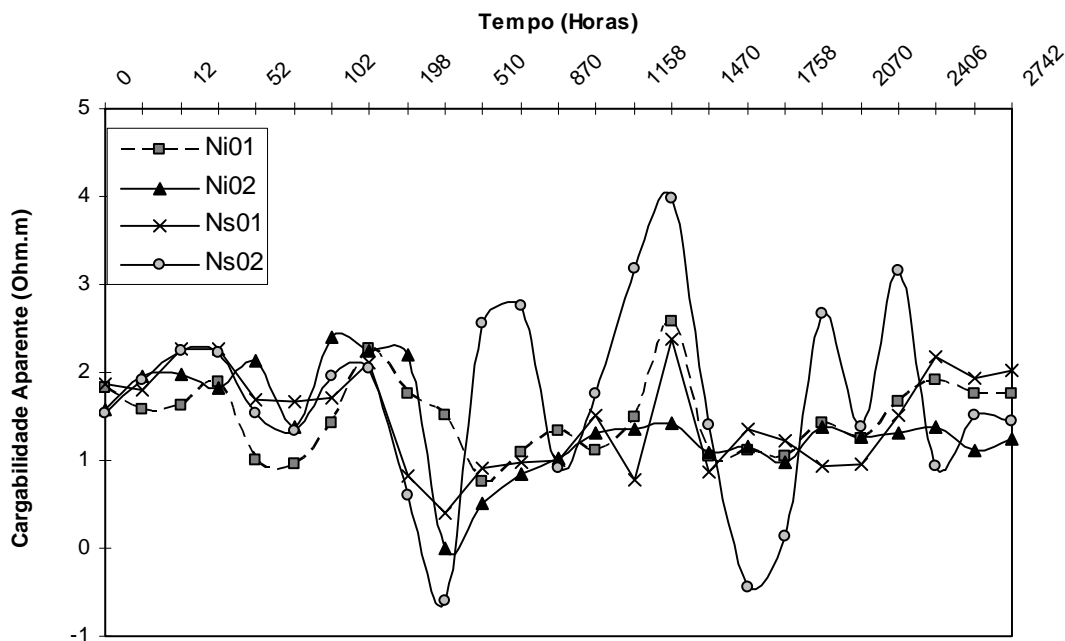


FIGURA 6.9 – Curvas integradas cargas aparentes

Considerando que os valores mínimos de carga aparente coincidem com elevação do NA, por entrada de água de chuva ou problemas na bóia do tanque, estabelecem-se relações entre altos valores de saturação com baixos valores de polarização eletrolítica.

As curvas de variação média dos parâmetros carga aparente e resistividade, para os dois estratos geoeletricos, reafirmam que os padrões principais nas variações desses parâmetros não são análogos.

As resistividades médias apresentam tendência de aumento nos valores nas horas iniciais após a contaminação, seguida de um brusco decréscimo, atingindo valores mínimos em torno de 342 horas. Posteriormente, as médias de resistividades assumem tendências crescentes, se aproximando dos valores naturais e que pode ser inferida por atividades de microorganismos degradadores do etanol (Figura 6.10).

As curvas sugerem uma relação direta entre o Eh e o nível de O<sub>2</sub> presente no experimento, pois, este parâmetro assume baixos valores para ensaios realizados com NA's mais profundos (Figura 6.10).

A entrada de O<sub>2</sub> no sistema pode estar associada à valores baixos de cargabilidade, em função da maior dissolução de sais, resultando em menor polarização eletrolítica (Figura 6.10).

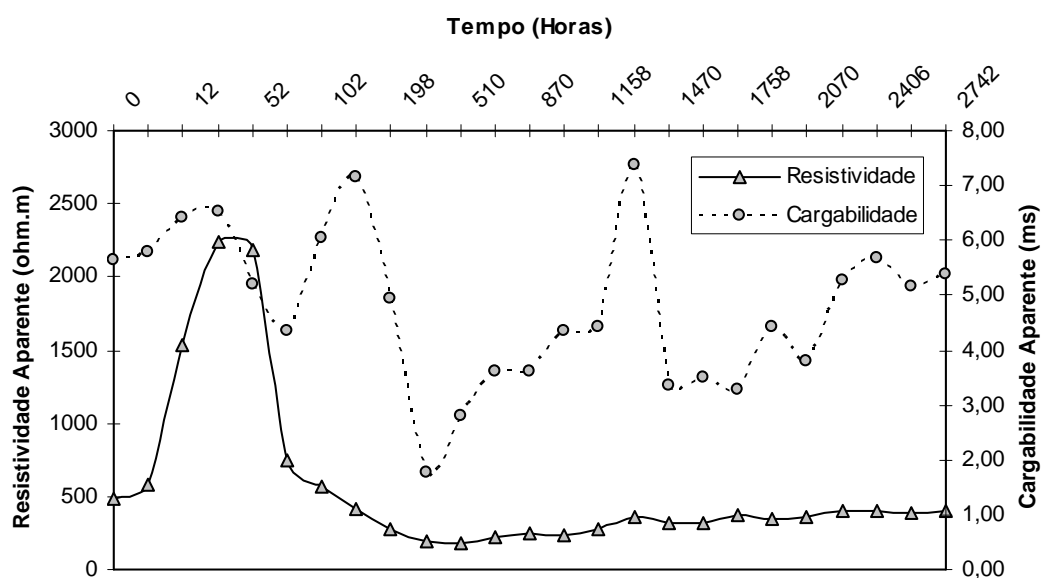


FIGURA 6.10 – Curvas de variação média de resistividade e cargabilidade

Em estudos realizados por Zanetti (2009) nas águas de saturação dos sedimentos contaminados por etanol utilizados na presente pesquisa, analisaram-se as variações temporais do potencial de oxiredução (Eh), potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica.

Esses estudos mostram que os valores de pH sofreram quedas após 3 dias (72 horas) da contaminação. (Figura 6.11).

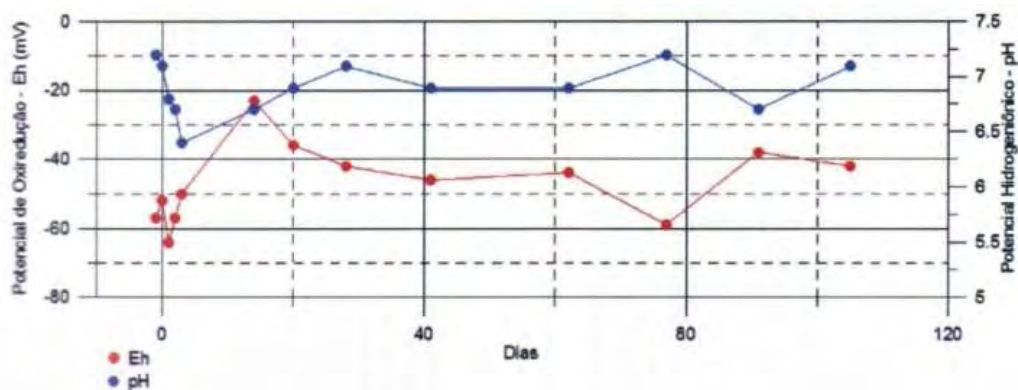


FIGURA 6.11 – Relação entre potencial de oxiredução e potencial hidrogeniônico (ZANETTI, 2009)

A diminuição nesses valores foi atribuída à biodegradação do etanol, que resulta na formação de ácido acético, que em solução aquosa dissocia-se formando altas concentrações de íons  $H^+$  e acetato.

A existência de acetato nas águas de saturação, pelos processos de biodegradação, altera as concentrações de sais na solução eletrolítica formada, que, pode ter condicionado as variações bruscas de resistividade dos sedimentos saturados nas horas iniciais do monitoramento geológico. Vale ressaltar que a existência de fluidos condutivos gerados na biodegradação do etanol também pode ter inferido reduções nas resistividades medidas no início da contaminação.

As tendências dos valores de condutividade elétrica foram de queda nos 14 primeiros dias da contaminação, seguida de graduais aumentos (Figura 6.12).

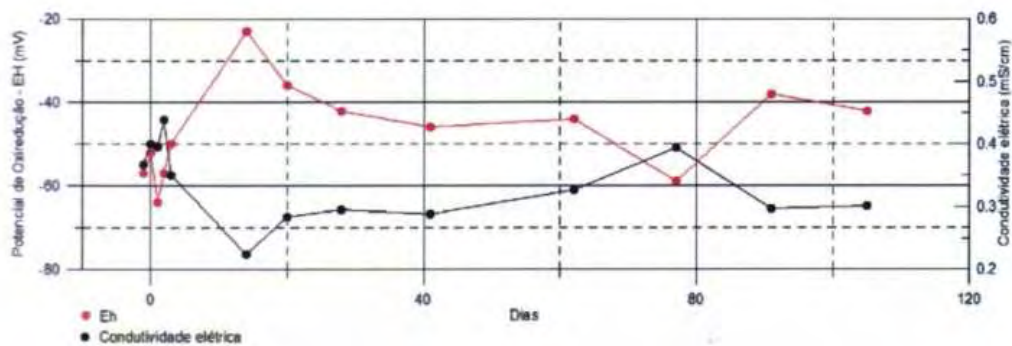


FIGURA 6.12 – Relação entre potencial de oxiredução e condutividade elétrica (ZANETTI, 2009).

Como a resistividade elétrica pode ser entendida como o inverso da condutividade, as quedas iniciais nas condutividades medidas no início da contaminação podem ser associadas aos aumentos de resistividades verificados nos ensaios de caminhamento elétrico perfilagem elétrica das horas iniciais da contaminação.

As tendências de condutividades decrescem até 14 dias (336 horas), período coincidente ao final da segunda fase do monitoramento, que é período que as variações bruscas de resistividade cessam, seguidas de gradual retorno aos valores de referência (terceira fase do monitoramento). As resistividades obtidas pelo monitoramento geológico apresentaram picos máximos nas primeiras 15 horas, aparentemente contrastando com as quedas nas condutividades, que se estenderam até os 14 dias iniciais. Entretanto, as quedas de pH (atribuídos à

biodegradação do contaminante, que alteram as propriedades do eletrólito) foram registradas nas horas iniciais da contaminação, o que ocasionaria as quedas de resistividades sem o aumento imediato das condutividades elétricas.

O Eh não apresenta valores positivos para as águas de saturação e suas tendências foram inversamente proporcionais às verificadas para o pH e condutividade elétrica.

O potencial espontâneo mede diretamente os processos de oxiredução, refletindo o Eh conjugado ao potencial de fluxo. Os valores negativos obtidos para o Eh nas águas de saturação dos sedimentos coincidem com os padrões de estabilidade obtidos para o potencial espontâneo nas perfilagens elétricas. Esses padrões mostram valores majoritariamente negativos para a faixa saturada dos sedimentos, que podem ser atribuídos aos baixos valores de Eh medidos nas águas de saturação, e valores de SP oscilantes na faixa insaturada dos sedimentos, que pode ser associada à baixa diluição do contaminante gerando variações nos potenciais espontâneos nos horizontes dessa faixa dos sedimentos.

## 7 – CONCLUSÕES

Os resultados atestam a eficiência das técnicas do caminhamento elétrico e perfilagem elétrica nesse tipo de investigação, pois são alteráveis em presença de etanol e sensíveis a sua dinâmica no meio geológico. Entre os métodos analisados, o potencial espontâneo e resistividade elétrica se mostram mais eficientes na investigação desse tipo de ocorrência, em detrimento da polarização induzida, que se mostra variável e de alta susceptibilidade a ruídos e distorções, ou à possível entrada de O<sub>2</sub>.

Os resultados de resistividade dos sedimentos se mostraram eficientes e de baixa interferência de ruídos, assumindo valores elevados no início do monitoramento, sugerindo o caráter resistivo nessa primeira fase da contaminação por etanol.

A elevação da resistividade teve um pico nas horas iniciais após a contaminação, sendo que após esse intervalo de tempo, houve uma queda em seus valores medidos atingindo valores inferiores aos obtidos nos sedimentos sem a presença do contaminante. O aumento dessas resistividades está associada à presença do etanol nos sedimentos saturados e insaturados. A posterior queda desses valores pode ter sido influenciada pela presença de fluidos condutivos gerados na biodegradação do contaminante.

As resistividades medidas na terceira fase do monitoramento sugerem uma tendência de retorno dos valores aos medidos no ensaio de referência. Essa fase do monitoramento pode estar associada à completa miscigenação do contaminante com as águas de saturação. O gradativo retorno das resistividades aos valores naturais sugere a evaporação do CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>.

A faixa insaturada dos sedimentos apresentou valores de resistividades médias normalmente maiores que as verificadas para a faixa saturada dos sedimentos, devido a presença do etanol em estado natural.

Os dados de cargabilidade mostraram maior influência de ruídos e distorções, sobretudo na região da superfície, nos locais avaliados como geradores de grandes resistências de contato entre eletrodos/sedimentos e nas proximidades das bordas do tanque de monitoramento.

A influência de água de chuva em alguns instantes do monitoramento pode ter influenciado algumas variações bruscas nos parâmetros físicos medidos.

Os resultados de potencial espontâneo foram claros e de baixa interferência. É evidente a influência da saturação em água. Os valores de SP mostram grandes variações na faixa insaturada dos sedimentos, enquanto que fica evidenciada uma convergência e posterior estabilidade dos valores faixas saturadas.

As análises gráficas das variações temporais dos parâmetros físicos estudados, sobretudo para as perfilagens elétricas, permitiram o estabelecimento de padrões de evolução para a faixa saturada e insaturada dos sedimentos, apontando diversidades e tendências entre elas.



## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIKEN, C.L.; HASTINGS, D.A. & STURGUL JR. Physical and computer modeling of Induzide Polarization. **Geophysical Prospecting**, v. 4, p.763-782, 1973.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Normas e terminologias técnicas de granulometria dos solos. **ABNT/NBR 6502, 1995.**

APPARAO, A.; SIVARAMA SASTRY, S.R. & SUBRAHMANYA SARMA, V. Depth of detection of buried resistive targets with some electrode arrays in electrical prospecting. **Geophysical Prospecting**, v.45, p. 365-375, 1997.

APPARAO, A.; GANGADHARA RAO, T.; SIVARAMA SASTRY, S.R. & SUBRAHMANYA SARMA, V. Depth of detection of buried conductive targets with different electrode arrays in resistivity prospecting. **Geophysical Prospecting**, v.40, p. 749-760, 1992.

ATEKWANA, E.A.; SAUCK, W.A.; WERKEMA JR, D.D. Investigations of geoelectrical signature at a hydrocarbon contaminated site. **Journal of Applied Geophysics**, nº 44, p. 167-180, 2000.

ATEKWANA, E.A.; WERKEMA JR., D.D.; ALLEN, J.P., SMART, L.A.; DURIS, J.W.; CASSYDI, D.P.; SAUCK, W.A.; ROSSBACK, S. Evidence for microbial enhanced electrical conductivity in hydrocarbon – contaminated sediments. **Geophysical Research Letters**, v.31, p. 1-4, 2004.

AZAMBUJA, E.; COSTA, A. F. U.; NANNI, A. S. O emprego da prospecção geofísica na avaliação de plumas de contaminação por hidrocarbonetos. In: **4º CON. BRAS. DE GEOTECNIA AMBIENTAL**. São José dos Campos, pp. 119-126. 1999.

BARKER, R.D. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrodes arrays. **Geophysics**, v.54, n.8, p. 1031-1037, 1989.

BENSON, A. K. Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities. **Journal of Applied Geophysics**, no33, p 177-193, 1995.

BENSON, A.K.; PAYNE, K.L.; STUBBEN, M.A. Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods – A case study. **Geophysics**, v. 62, n. 1, p. 80-86, 1997.

BERTIN, J. & LOEB, J. Experimental and Theoretical Aspects of Induced Polarization. **Geopublication Associates. Berlin**. v. 1, 250p., 1976.

BRAGA, A.C.O. **Métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos Estudos da Captação e Contaminação de Águas Subterrâneas: Uma Abordagem Metodológica e Prática**. Tese de Livre-Docência - Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 121 p., 2006.

BRAGA, A.C.O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro-SP**. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 169p., 1997.

BRAGA, A.C.O.; MOREIRA, C.A.; CARDINALI, M.T. Variação temporal da resistividade elétrica em contaminação por gasolina. **Geociências**, v. 27, n. 4, p. 517-525, 2008.

CASSIDY, D. P.; WERKEMA, D. D. JR.; SAUCK, W.; ATEKWANA, E.; ROSSBACH, S.; DURIS, J. The Effects of LNAPL Biodegradation Products on Electrical Conductivity Measurements. **Journal of Environmental & Engineering Geophysics**, v. 6, nº 1, pg 47-52, 2001.

CAVALCANTI, S.S.; SATO, H.K. & LIMA, O.A.L. Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do aterro metropolitano centro, salvador, Bahia. **Brasilian Journal of Geophysics**, v. 19, n.2, p. 155-168, 2001.

CORSEUIL, H.X.; SANTOS, R.F.; FERNANDES, M. **Contaminação de aquíferos por derramamentos de gasolina e álcool**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA e AMBIENTAL, Foz do Iguaçu-PR, p. 2448-2452, 1997.

CORWIN, R. F. **The self-potential for environmental and engineering applications**. In: Geotechnical and Environmental Geophysics, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, USA, Investigations in Geophysics, nº 5, p.127-145., 1990.

DOBECKI, T.L. & ROMIG, P.R. Geotechnical and groundwater geophysics. **Geophysics**, v.50, n.12, p.2621-2636,1985.

DRASKOVITS, P.; HOBOT, J.; VERO, L.; SMITH, B. Induced-polarization surveys applied to evaluation of groundwater resources. **Society of Exploration Geophysicists**, p. 379-396, 1990.

ELLERT, N.; GREENHOUSE, J.; WILLIAMS, M.M. A geofísica no estudo da poluição da água subterrânea. **Revista Ambiente**, v. 2, n. 2, 1988.

ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para reposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n.1, p. 119-134, 2002.

FERNANDES, M.; CORSEUIL, H.X. **Contaminação de águas subterrâneas por derramamento de gasolina: efeito cossolvência**. Simposio Italo-Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambiental, Gramado-RJ. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1996.

FERREIRA, J. & ZUQUETTE, L.V. Considerações sobre as interações entre contaminantes constituídos de hidrocarbonetos e os componentes do meio físico. **Geociências**, nº 17, p. 527 – 557, 1998.

FERREIRA, M.F.; OLIVEIRA, E.; DUARTE, U. Comportamento da gasolina com etanol (E-20) e da gasolina pura após a simulação de um vazamento em colunas de laboratório. **Revista do Instituto de Geociências-USP**, v. 4, n.2, p. 91-102, 2004.

GALLAS, J.D.F. O método do Potencial Espontâneo (SP) – uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n.2, p. 133-144, 2005.

GALLAS, J. D. F, **Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental**. Rio Claro, Tese de Doutorado em Geociências – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 174p, 2000.

GALLAS, J.D.F. & VERMA, O.P. Resistividade e polarização induzida (IP) – modelagem analógica. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 1, p. 25-34, 2006.

GANDOLFO, O.C.B. **Um estudo do imageamento geométrico na investigação rasa**. Tese de Doutorado – Instituto de Astrofísica e Geofísica da Universidade de São Paulo, 215 p., 2007.

IAKUBOVSKII, I.U.V.; LIAJOV, L.L. **Exploracion electrica**. Espanha, Editorial Reverte, S.A., 421 p., 1980.

KELLER, G. V. & FRISCHKNECHT, F. C. Electrical methods in geophysical prospecting. **Pergamon Press**, 562p., 1966.

LIMA, O.A.L.; SATO, H.K.; PORSANI, M. J. Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques. **Journal Applied Geophysics**, v. 34, n. 2, p.93-108, 1995.

MARQUES, F. Vias para avançar como líder do etanol. **Pesquisa Fapesp**, nº149, p. 20-25, 2009.

MONTEIRO, A.C. & PORSANI, M.J. Delimitação de topo de aquífero na região de Porto Seguro- Bahia através da inversão de sondagens elétricas verticais. **Brazilian Journal of Geophysics**. v. 19, n.3, p. 279-292, 2001.

MOREIRA, C.A. & BRAGA, A.C.O. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.14, nº2, 2009.

MOREIRA, C.A.; BRAGA, A.C.O. Aplicação do método da Polarização Induzida em aterro controlado. **Geociências**, v. 27, n.2, p. 219-227, 2008.

MOREIRA, C.A. & DOURADO, J.C. Análise de contaminantes de fase líquida não aquosa (napls) por aplicação do método eletromagnético indutivo (EM). **Revista Brasileira de Geofísica**, vº 23, nº3, p. 213-220, 2005.

MOREIRA, C.A.; DOURADO, J.C.; BRAGA, A.C.O. Aplicação da técnica do caminhamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 4 p. 1-10, 2006.

MOURA, H.P. & MALAGUTTI FILHO, W. Métodos da Eletrorresistividade e da Polarização Induzida aplicados no estudo do aterro controlado de Piracicaba – SP. **Geociências**, v.26, n.1, p. 35-43, 2007.

NUNES, C.C.; CORSEUIL, H.X. Importância do etanol na atenuação natural de águas subterrâneas impactadas por gasolina. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, nº 3, p. 259-265, 2007.

ORELLANA, E.. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua**. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, 523 p., 1972.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica por campos variables**. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, 571 p., 1974.

OSELLA, A.; VEJA, M. & LASCANO, E. Characterization of a contaminant plume due to a hydrocarbon spill using geoelectrical methods. **Journal of Environmental & Engineering**, v.7, p. 78-87, 2002.

PORSANI, J.L.; BORGES, W.R.; ELIS, V.R.; DIOGO, L.A.; HODO, F.Y.; MARRANO, A.; BIRELLI, C.A. Investigações geofísicas de superfície e de poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 3, p. 245-258, 2004.

SATO, M. & MOONEY H. D. The electrochemical mechanism of sulfide selfpotential. **Geophysics**, v. 25, nº 1, p. 226-249, 1960.

SAUCK, W.A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. **Journal of Applied Geophysics**, 44. p. 151-165, 2000.

SHERIFF, R. E. Geophysical Methods. **New Jersey: Prentice Hall**, p 175-201, 1989.

SILVA, J.E.; LOUREIRO, E.M.L.; ELIS, V.R.; HODO, F.Y.; PORSANI, J.L. Aplicação de ensaios elétricos e eletromagnéticos em problema de poluição ambiental. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 30, n. 3, p. 193-198, 2002.

SUMNER, J.S. Principles of induced polarization for geophysical exploration. **Elsevier Scientific, Amsterdam**, 277 p., 1976.

TAIOLI, F.; GALLAS, J.D.F.; RIBEIRO, V.; LEZZI, P. B. T.; NASCIMENTO, D. P. V. Desenvolvimento e testes de mini-sonda Wenner para avaliação de contaminações rasas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 4, p. 525-534, 2006.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2o ed., New York, Cambridge University Press, 774 p., 2004.

VAN VOOHIS, G. D.; NELSON, P. H.; DRAKE, T. L. Complex resistivity spectra of porphyry copper mineralization. **Geophysics**, v. 38, p. 49-60, 1973.

WARD, S.H. Resistivity and induced polarization methods. **Society of Exploration Geophysicists**, v. 10, nº 5 p. 147-189, 1990.

WERKEMA JR., D.D., ATEKWANA, E.A., ENDRES, A.L., SAUCK, W.A., CASSIDY, D.P. Investigating the geoelectrical response of hydrocarbon contamination undergoing biodegradation. **Geophysical Research Letters**, v. 30, nº12. 2003.

ZANETTI, N. **Análise das águas de saturação de sedimentos contaminados por combustíveis**. Monografia – Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 55 p., 2009.

**- APÊNDICE A –**

-

**- MODELOS DE INVERSAO DE RESISTIVIDADE**

-

**- MODELOS DE INVERSÃO DE CARGABILIDADE**



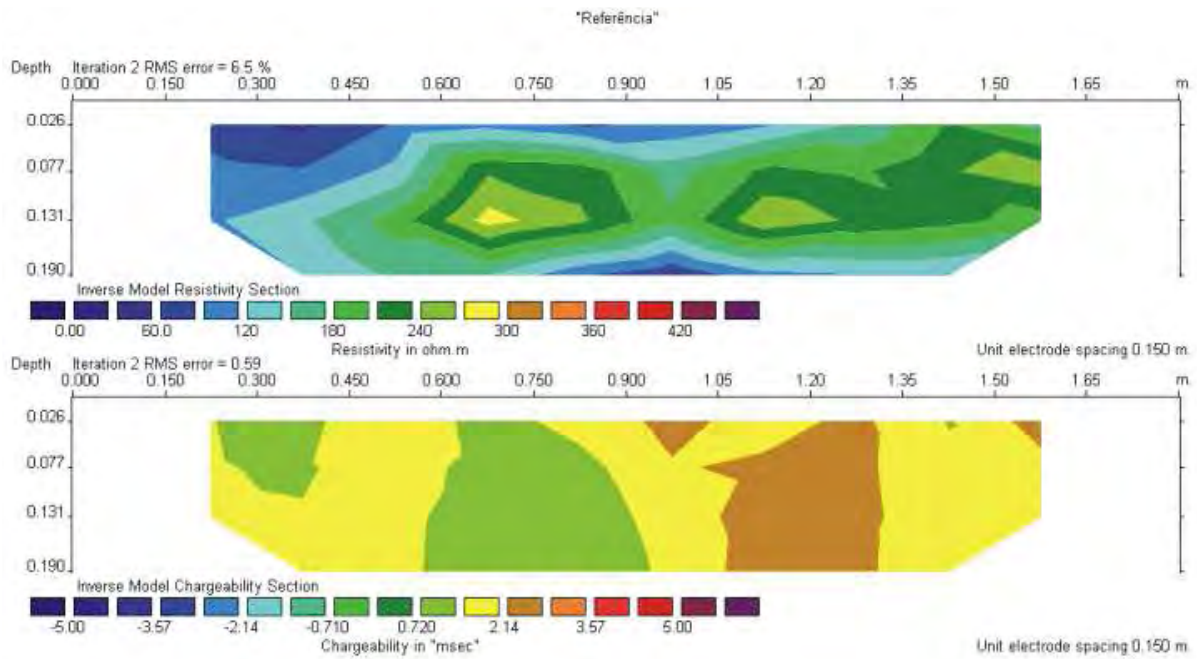


Figura A1 – Ensaio 01 (referência) – resistividade e cargabilidade

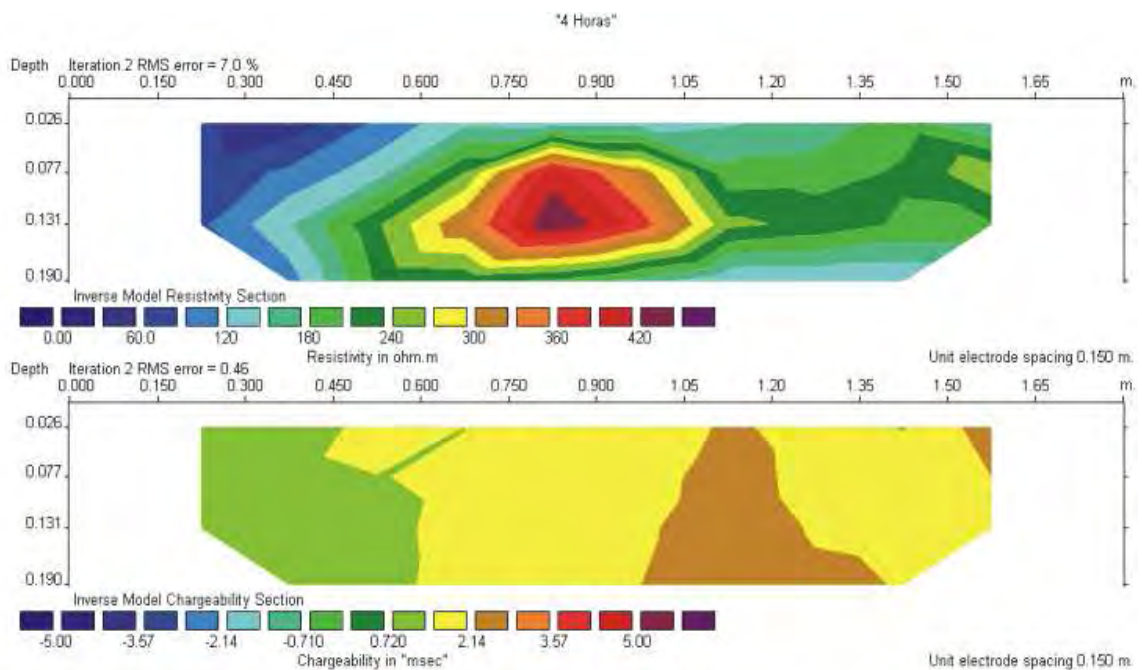


Figura A2 – Ensaio 02 (4 horas) – resistividade e cargabilidade

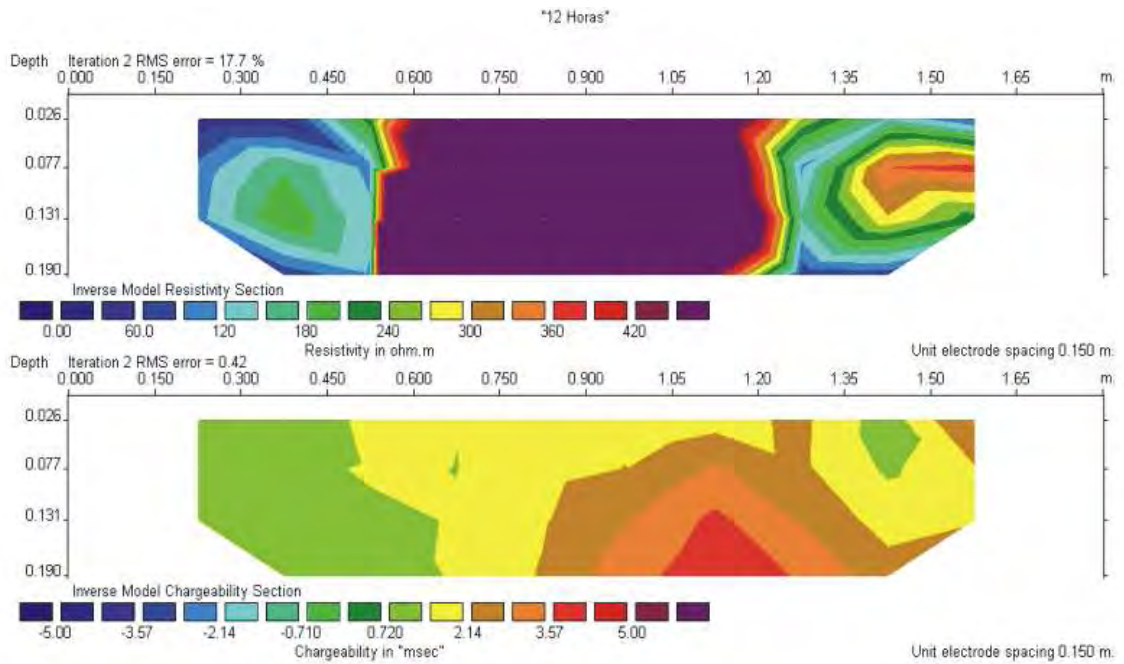


Figura A3 – Ensaio 03 (12 horas) – resistividade e cargabilidade

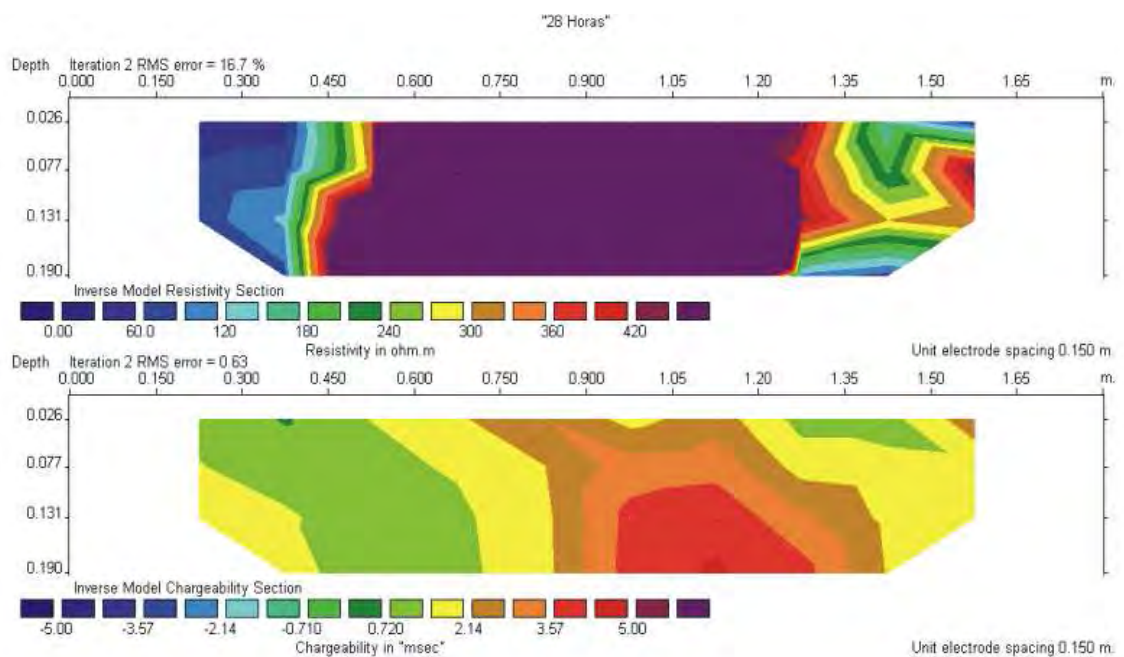


Figura A4 – Ensaio 04 (28 horas) – resistividade e cargabilidade

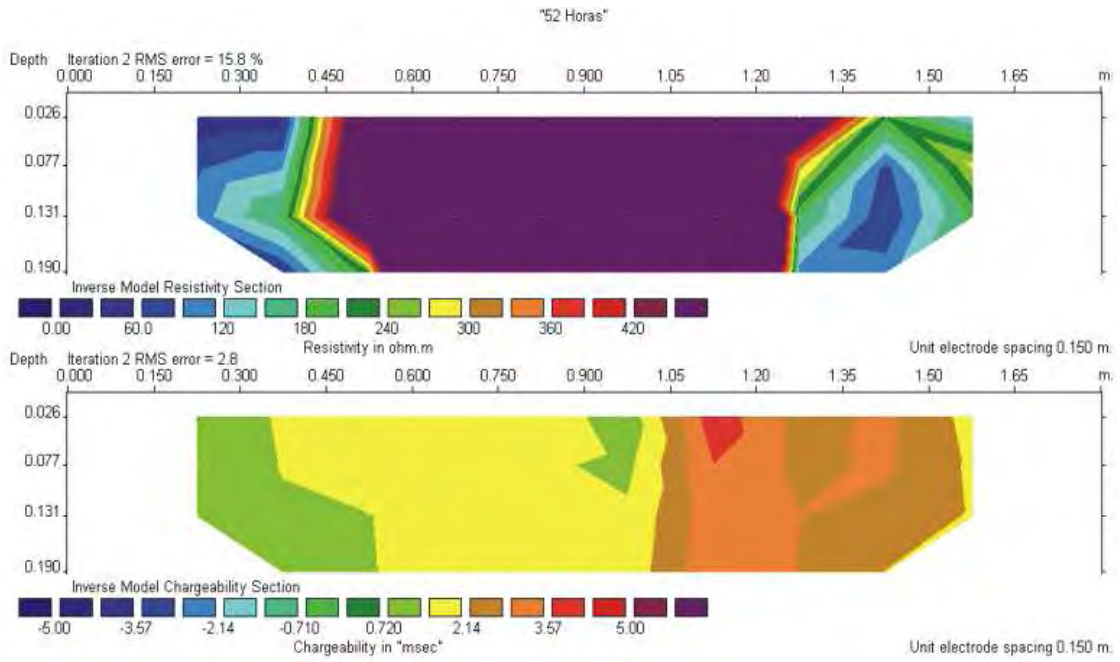


Figura A5 – Ensaio 05 (52 horas) – resistividade e cargabilidade

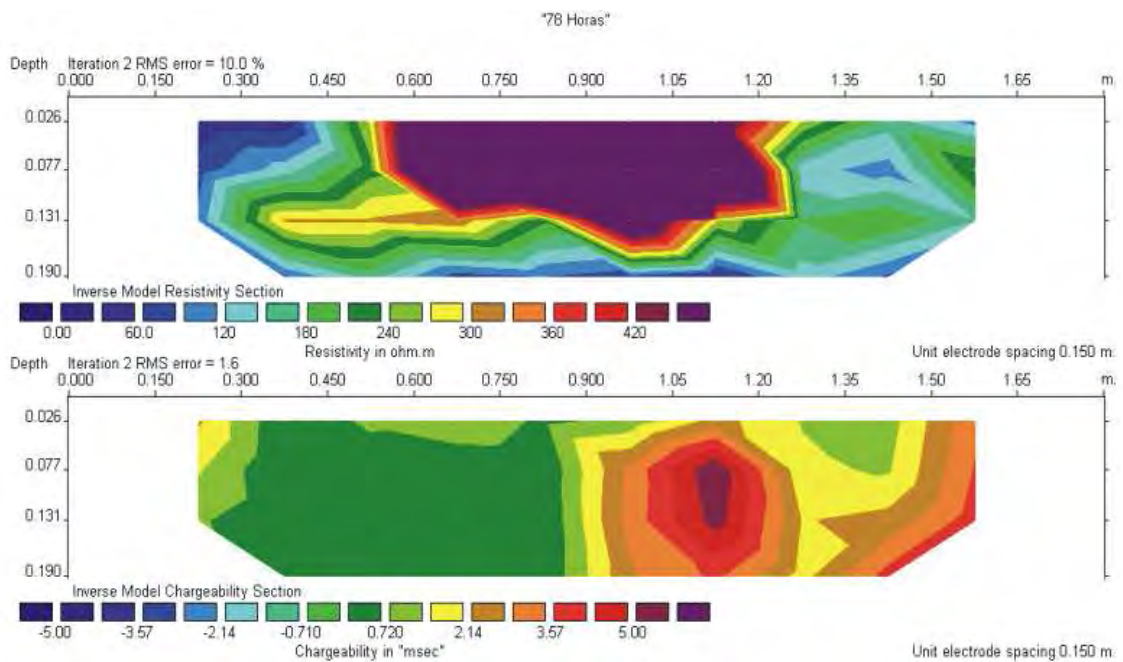


Figura A6 – Ensaio 06 (78 horas) – resistividade e cargabilidade

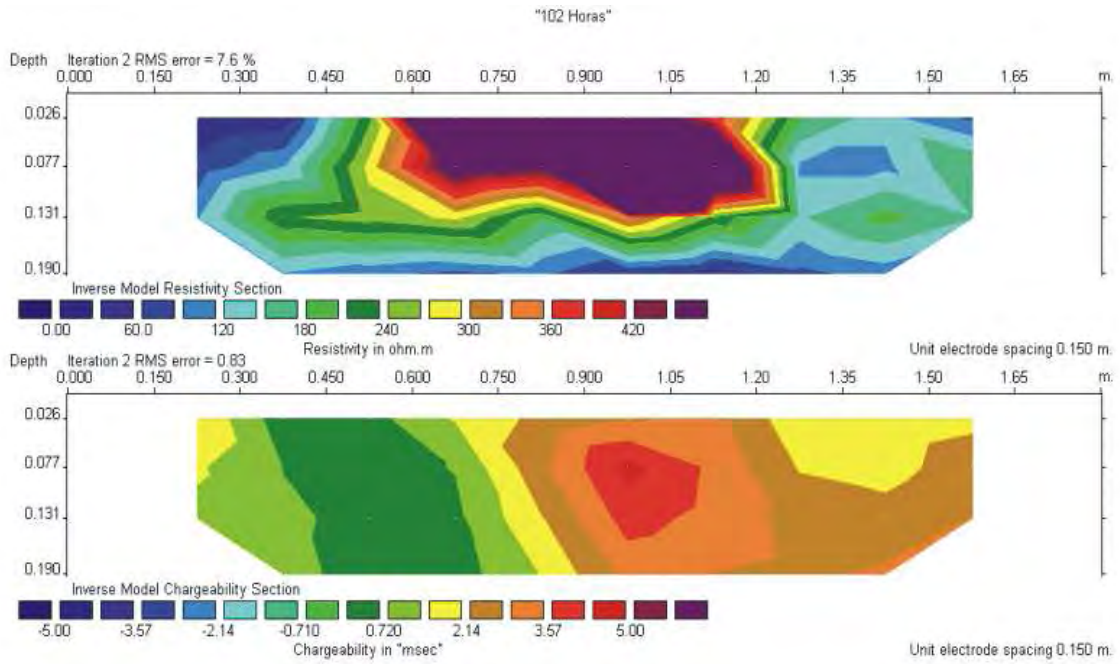


Figura A7 – Ensaio 07 (102 horas) – resistividade e cargabilidade

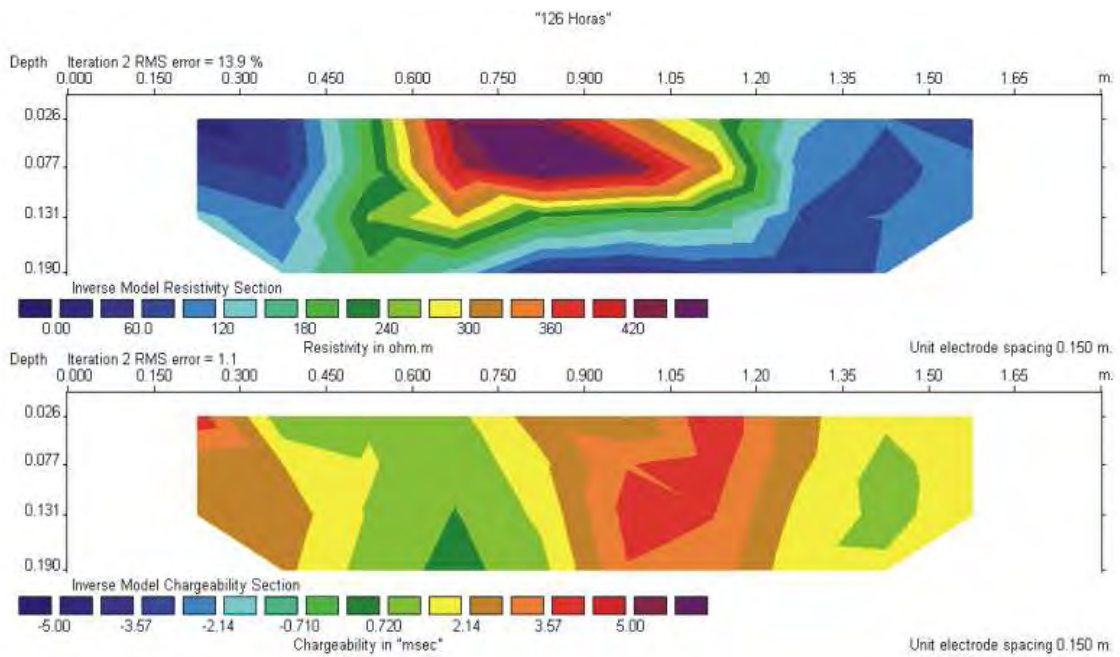


Figura A8 – Ensaio 08 (126 horas) – resistividade e cargabilidade

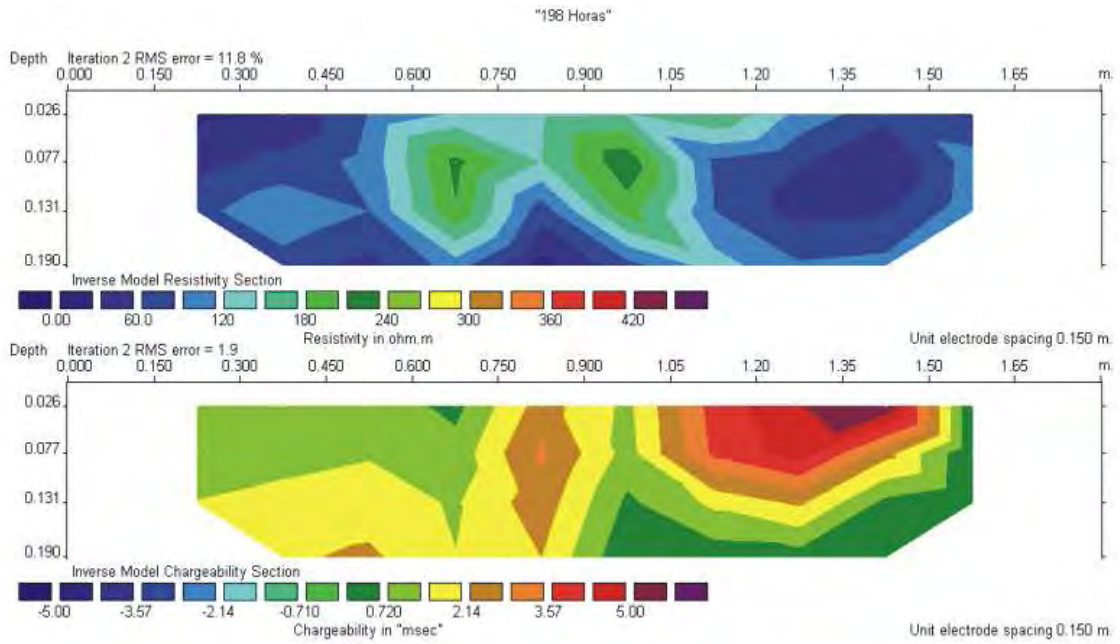


Figura A9 – Ensaio 09 (198 horas) – resistividade e cargabilidade

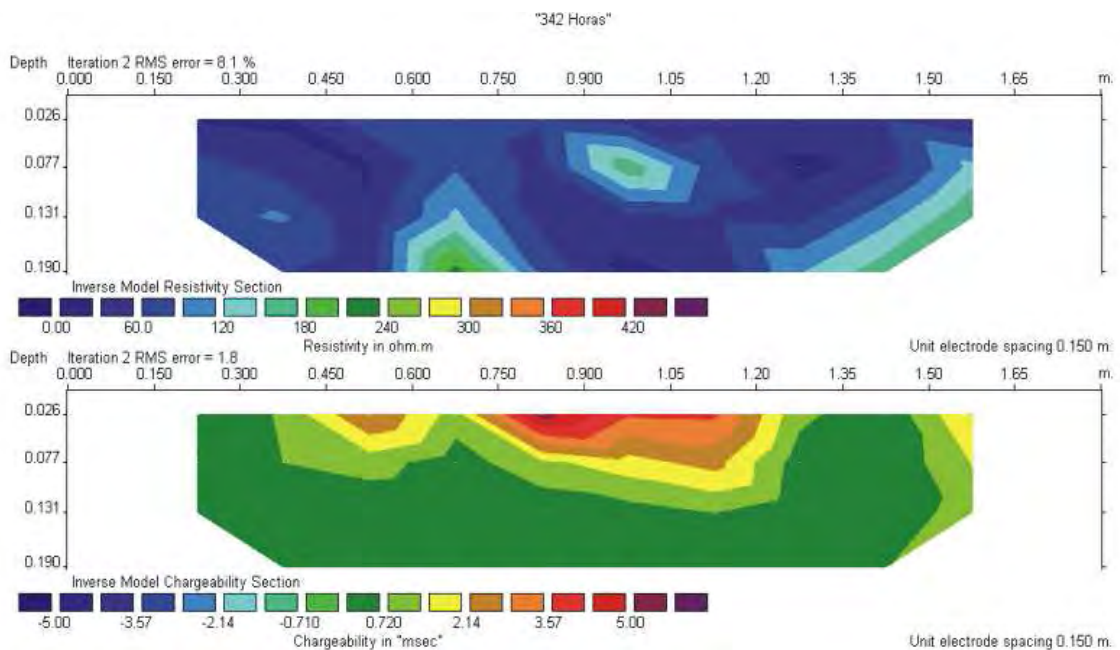


Figura A10 – Ensaio 10 (342 horas) – resistividade e cargabilidade

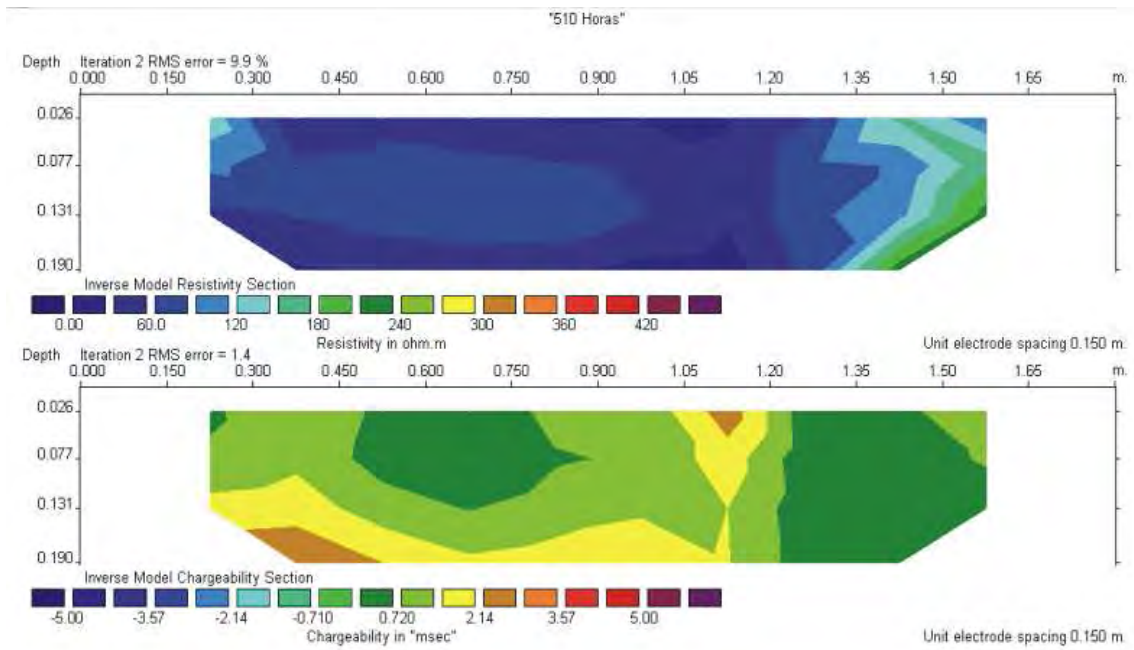


Figura A11 – Ensaio 11 (510 horas) – resistividade e cargabilidade

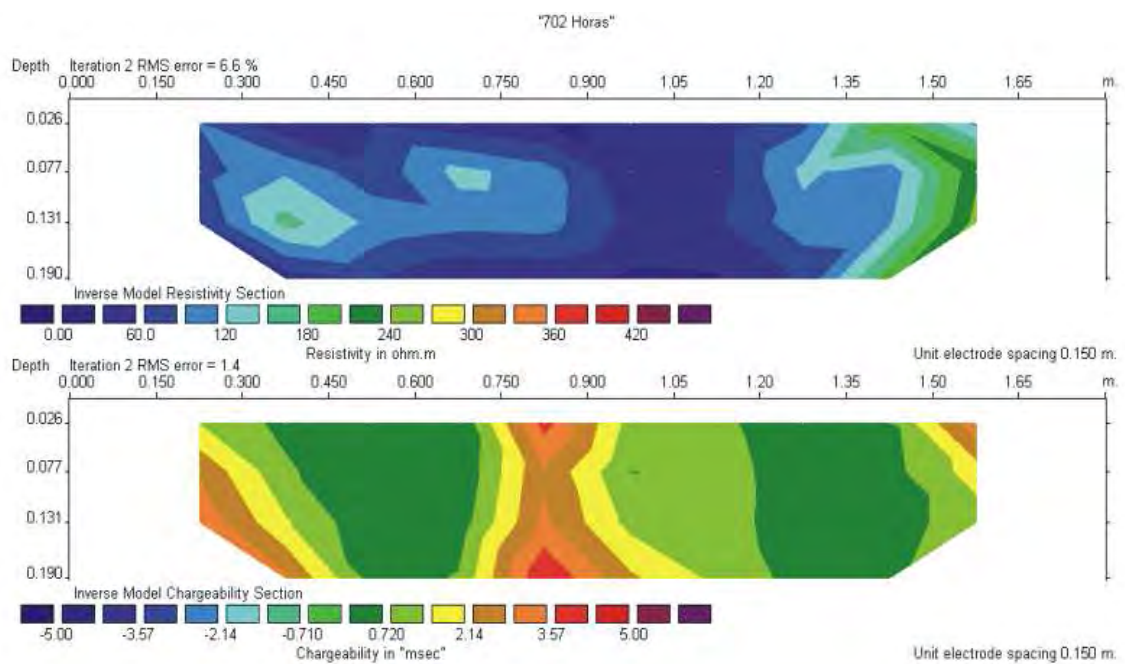


Figura A12 – Ensaio 12 (702 horas) – resistividade e cargabilidade

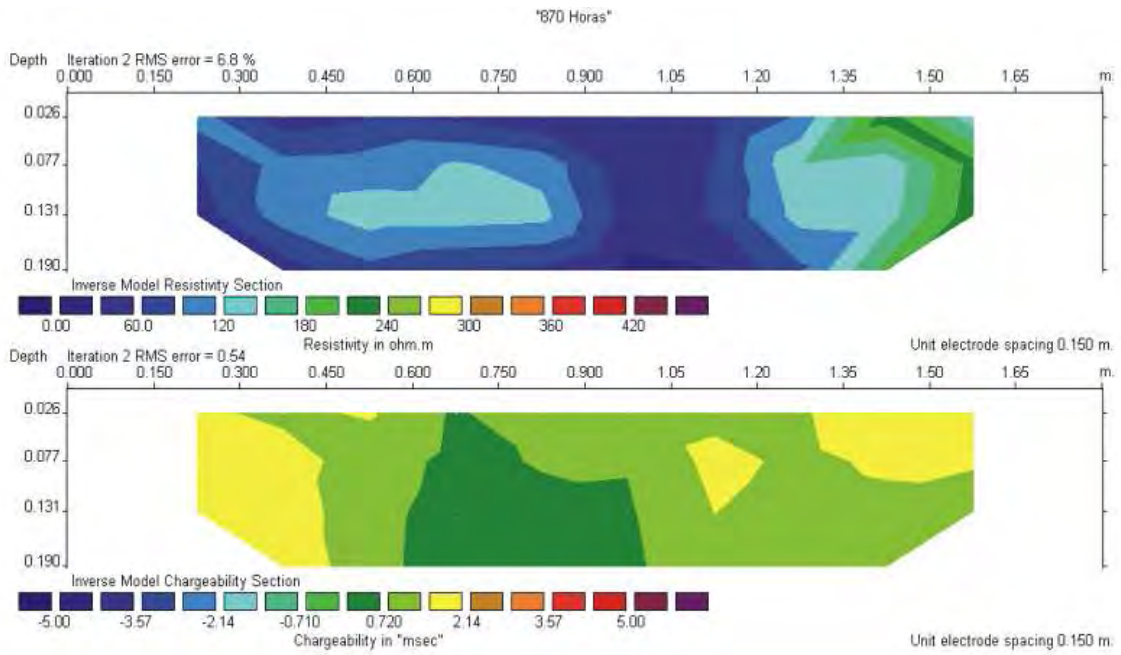


Figura A13 – Ensaio 13 (870 horas) – resistividade e cargabilidade

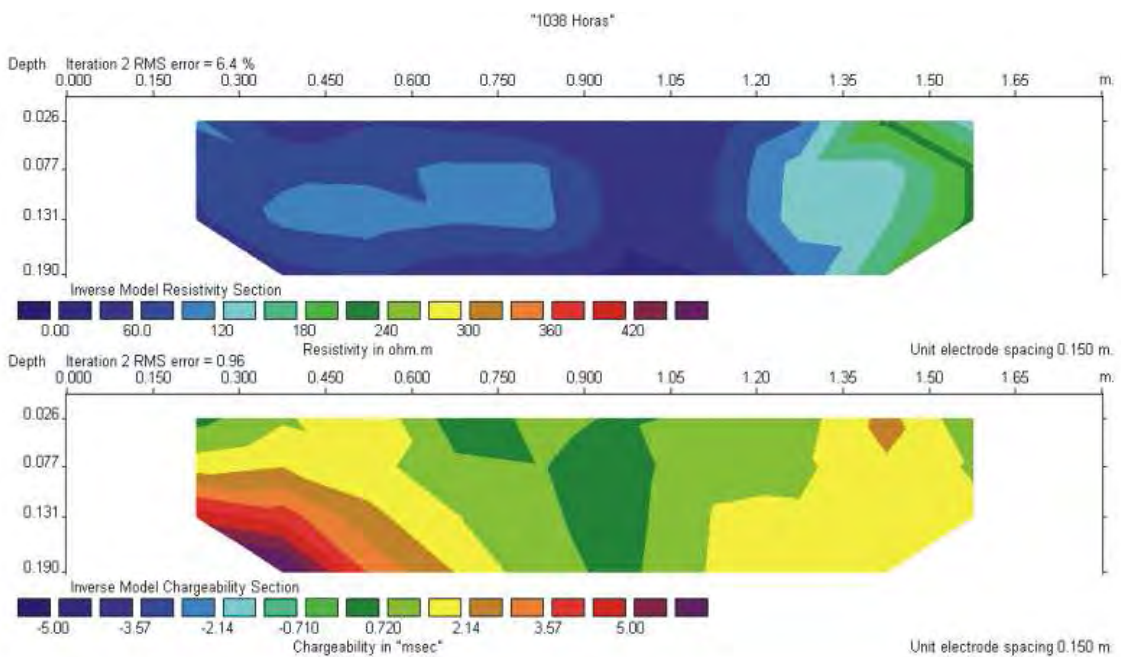


Figura A14 – Ensaio 14 (1038 horas) – resistividade e cargabilidade

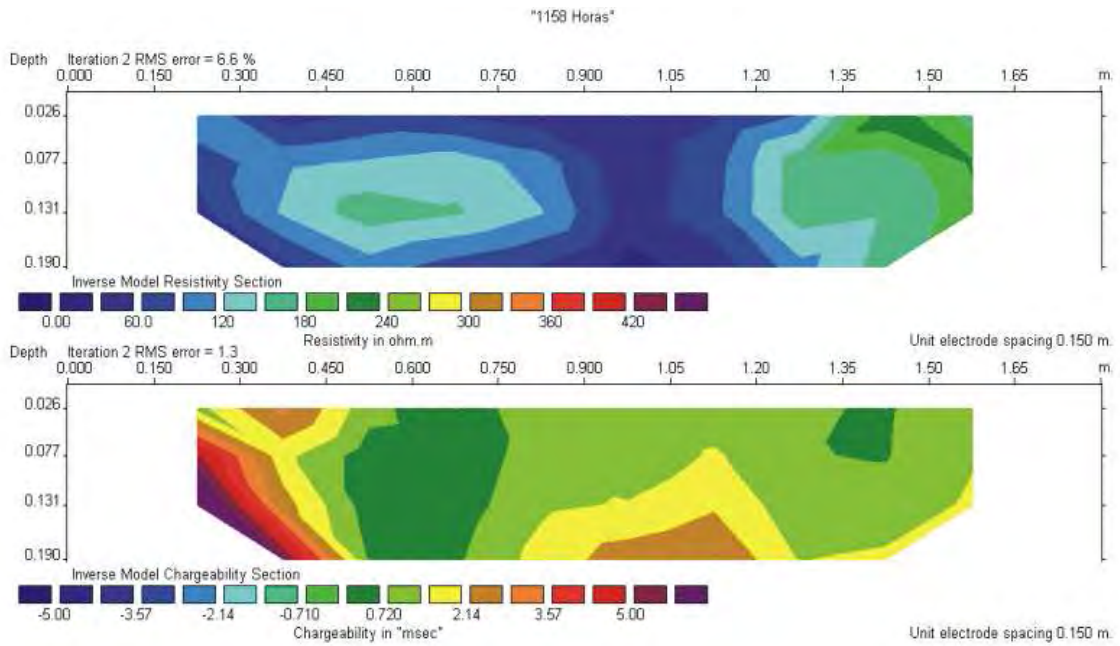


Figura A15 – Ensaio 15 (1158 horas) – resistividade e cargabilidade

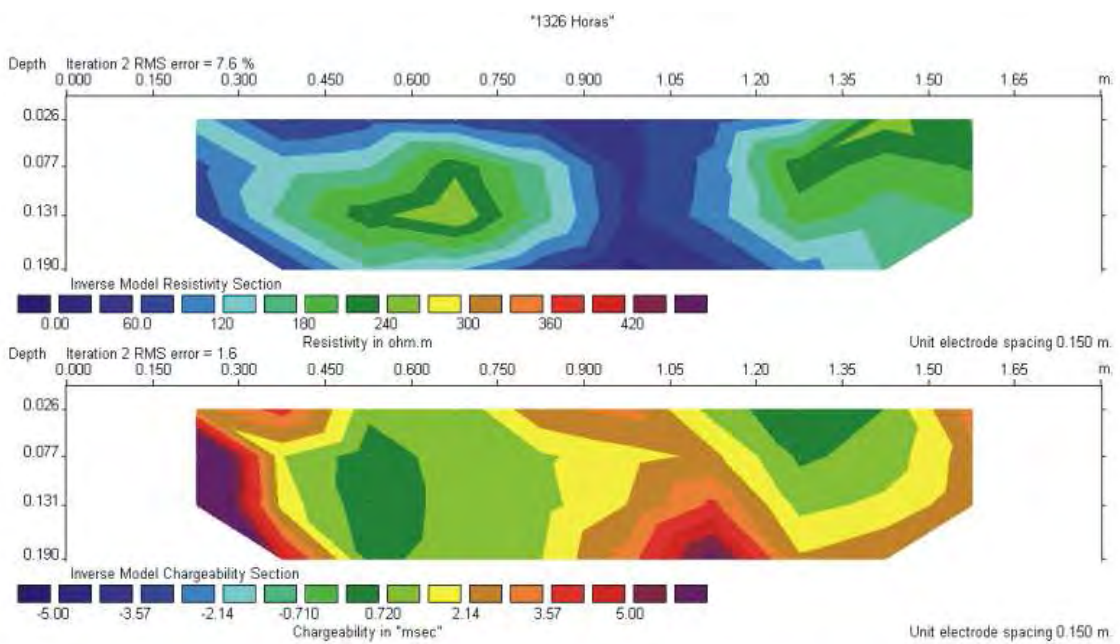


Figura A16 – Ensaio 16 (1326 horas) – resistividade e cargabilidade



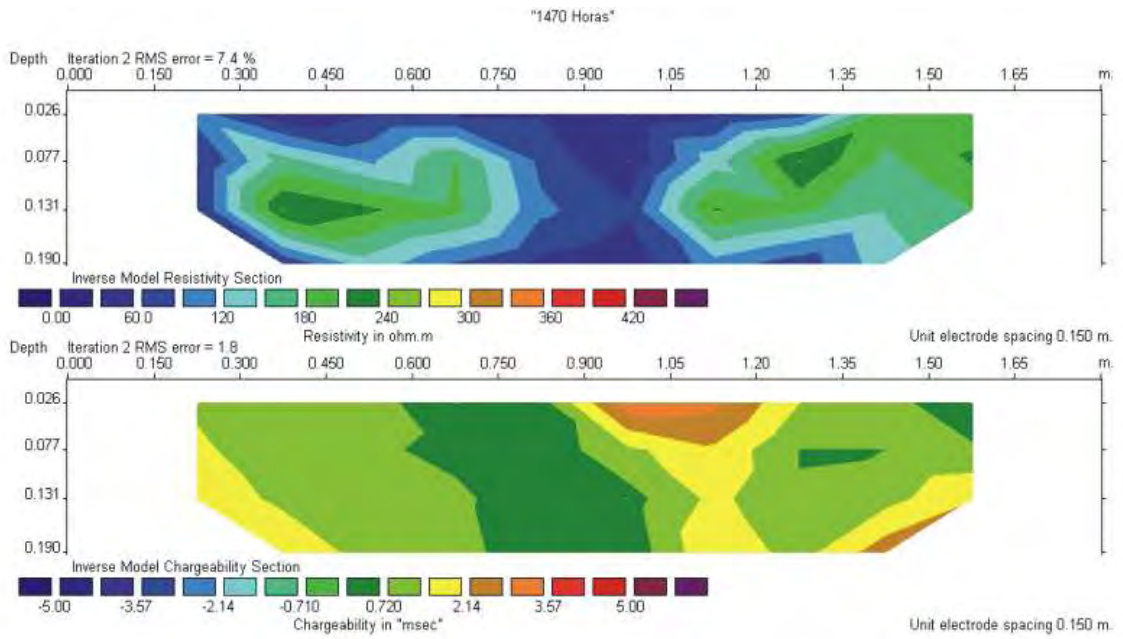


Figura A17 – Ensaio 17 (1470 horas) – resistividade e cargabilidade

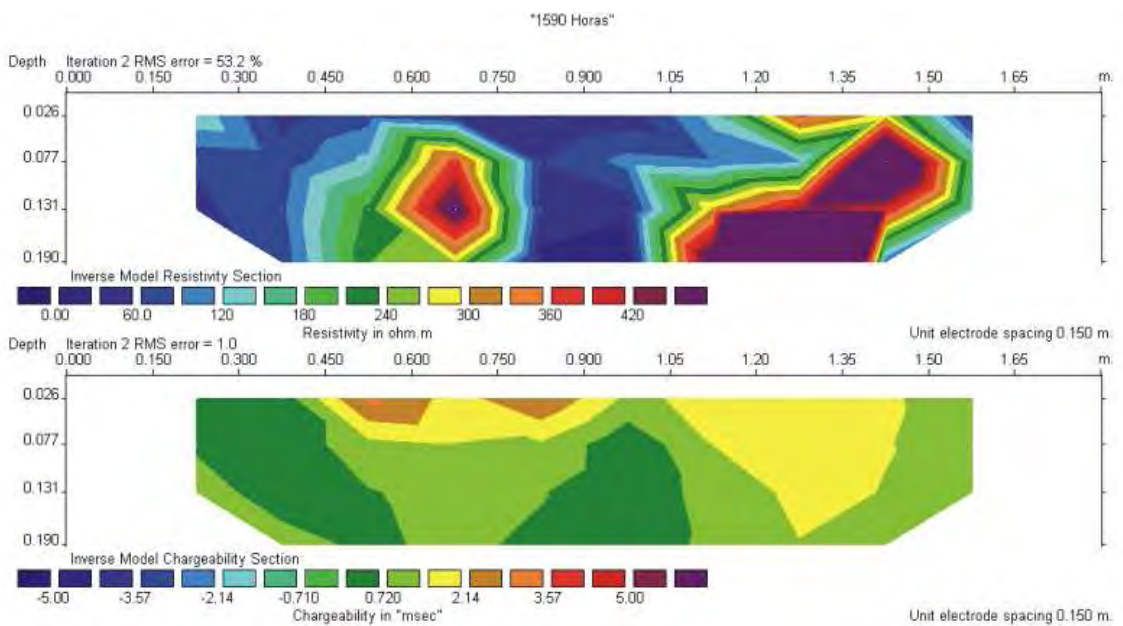


Figura A18 – Ensaio 18 (1590 horas) – resistividade e cargabilidade

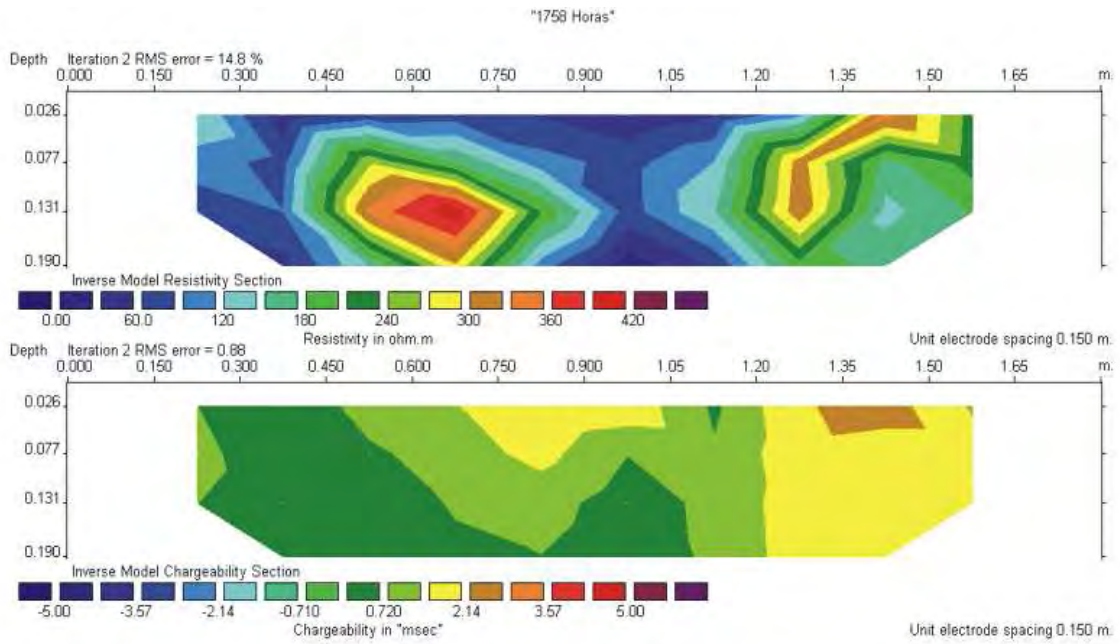


Figura A19 – Ensaio 19 (1758 horas) – resistividade e cargabilidade

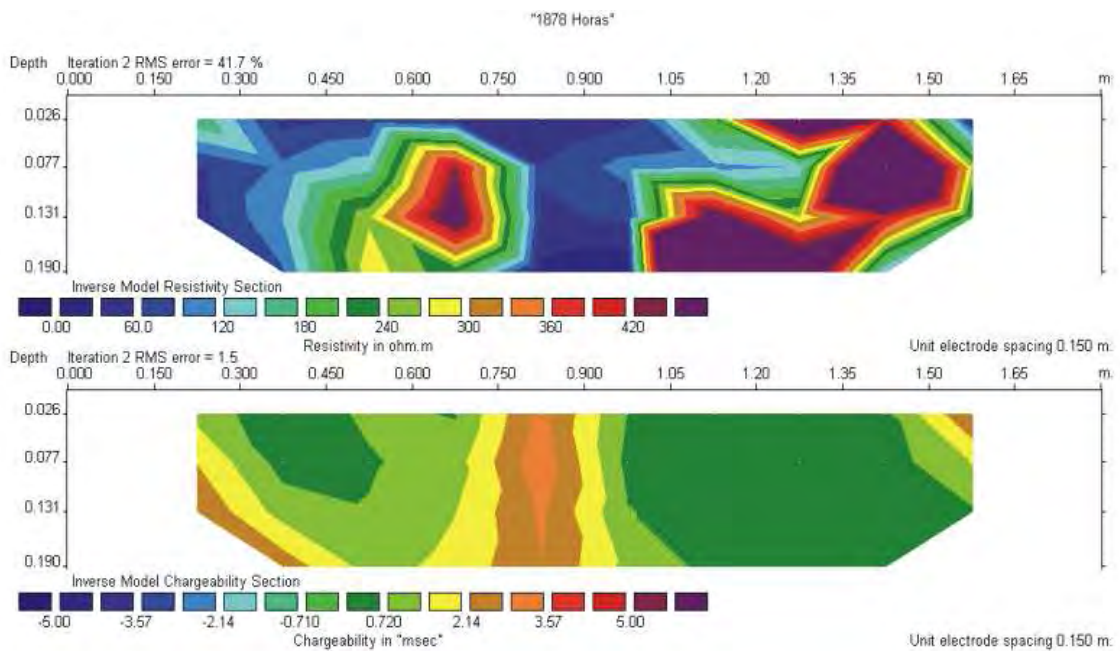


Figura A20 – Ensaio 20 (1878 horas) – resistividade e cargabilidade

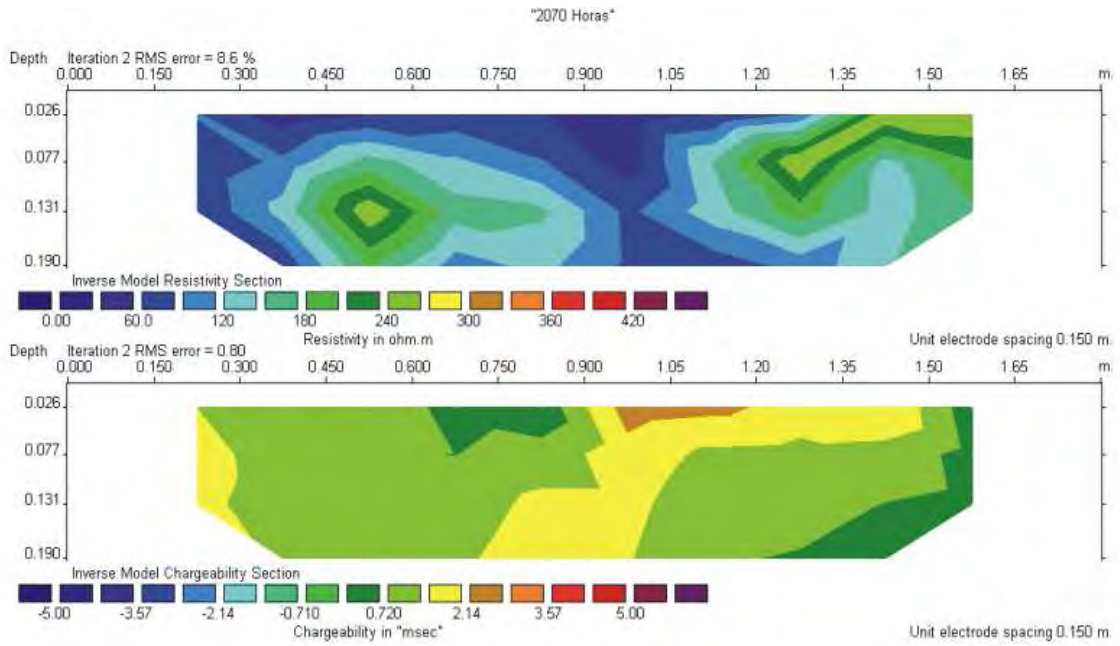


Figura A21 – Ensaio 21 (2070 horas) – resistividade e cargabilidade

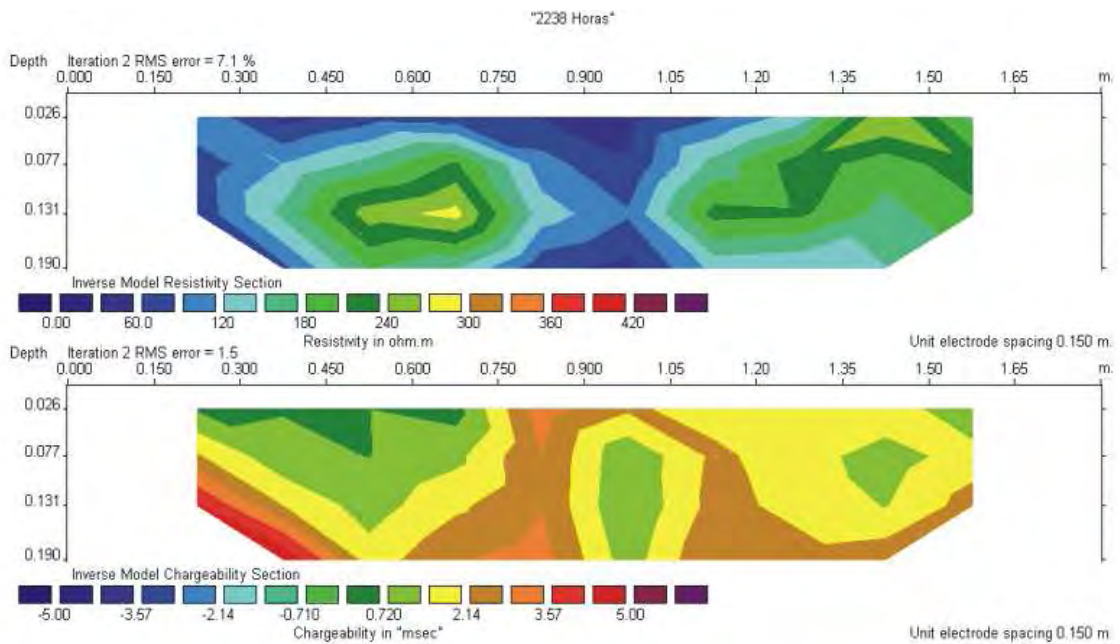


Figura A22 – Ensaio 22 (2238 horas) – resistividade e cargabilidade

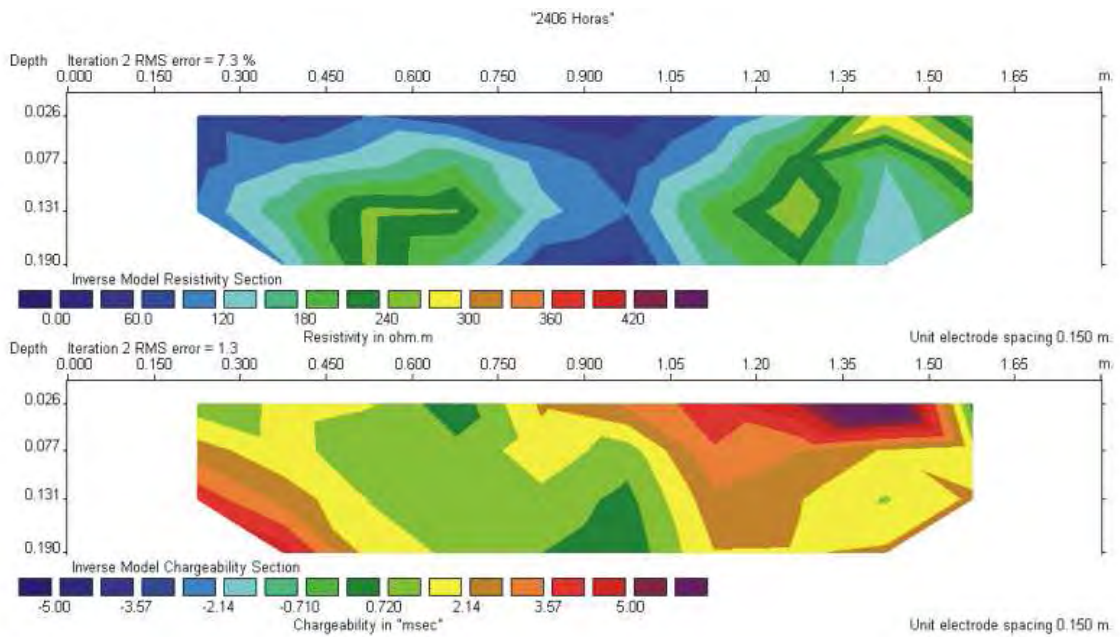


Figura A23 – Ensaio 23 (2406 horas) – resistividade e cargabilidade

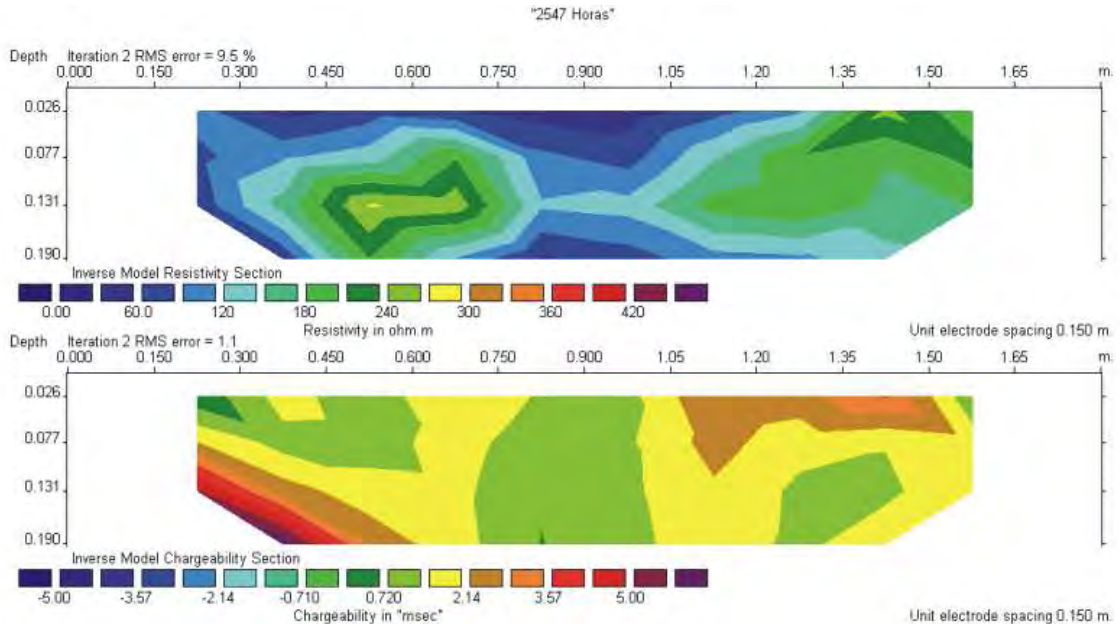


Figura A24 – Ensaio 24 (2547 horas) – resistividade e cargabilidade

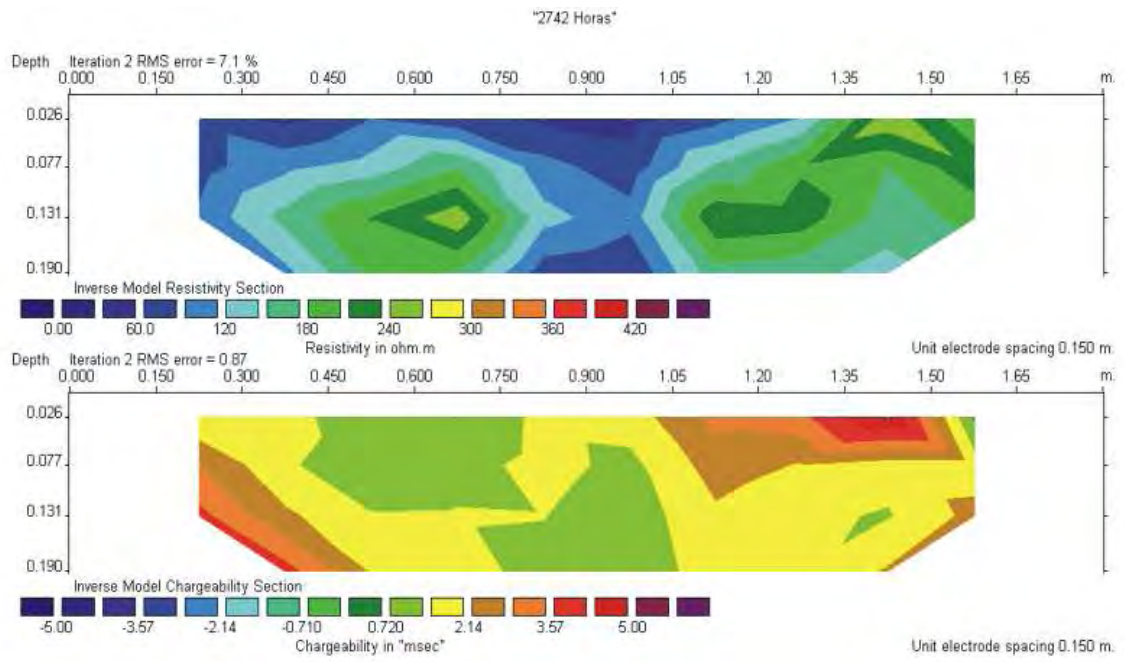


Figura A25 – Ensaio 25 (2742 horas) – resistividade e cargabilidade

**- APÊNDICE B –**

-

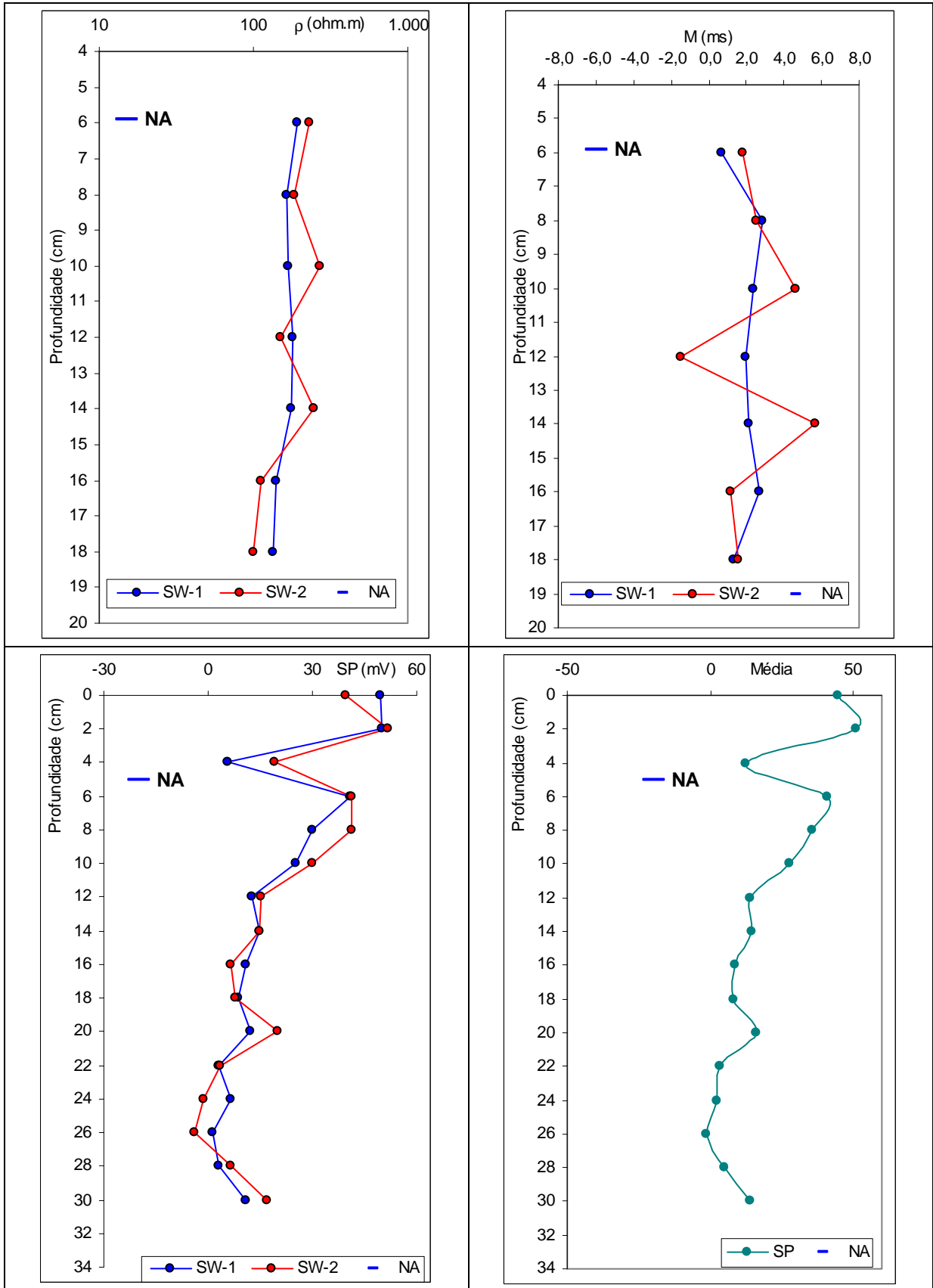
**- CURVAS DE RESISTIVIDADE - PERF**

-

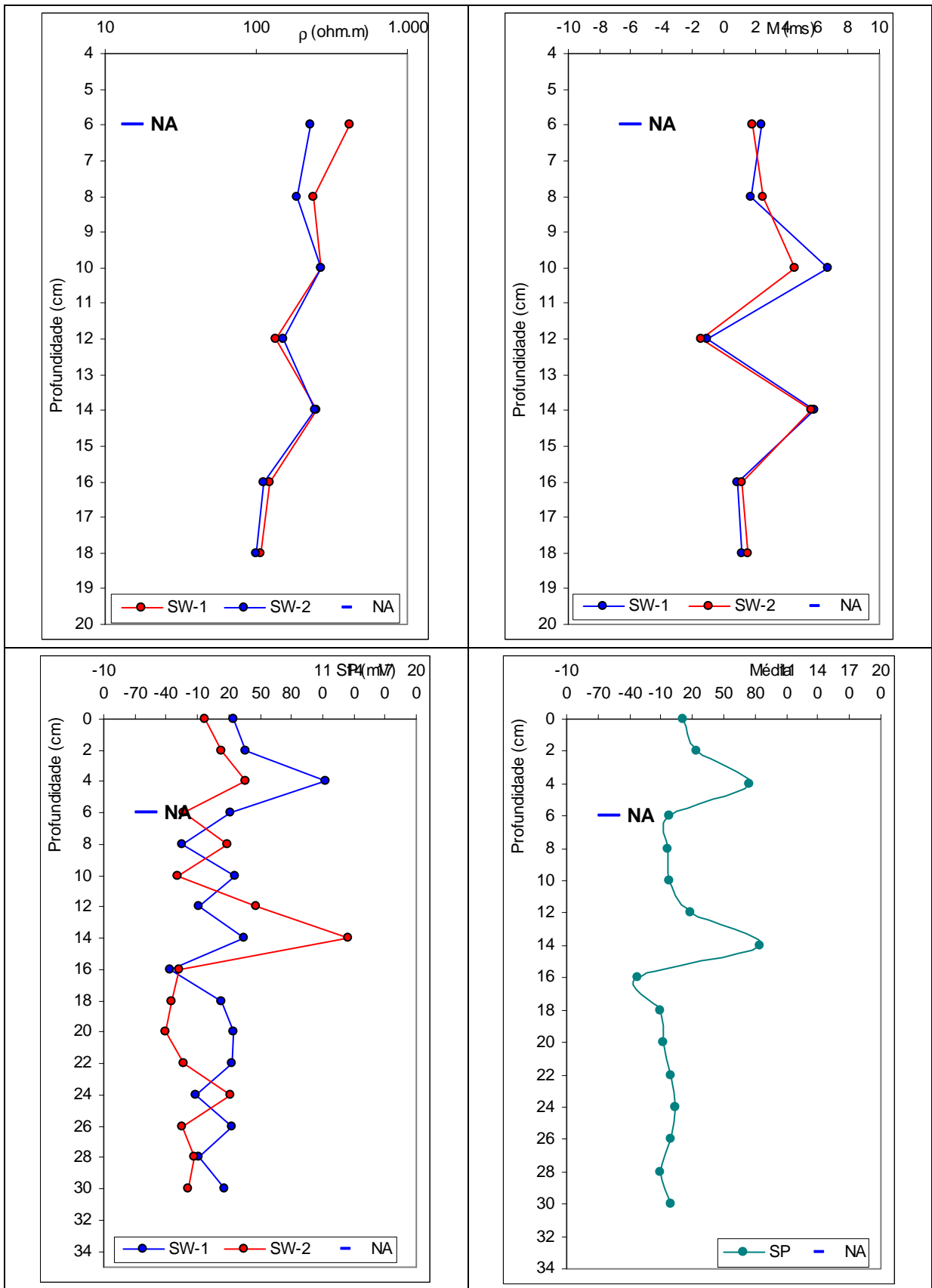
**- CURVAS DE CARGABILIDADE – PERF**

-

**- CURVAS DE POTENCIAL ESPONTÂNEO – PERF**

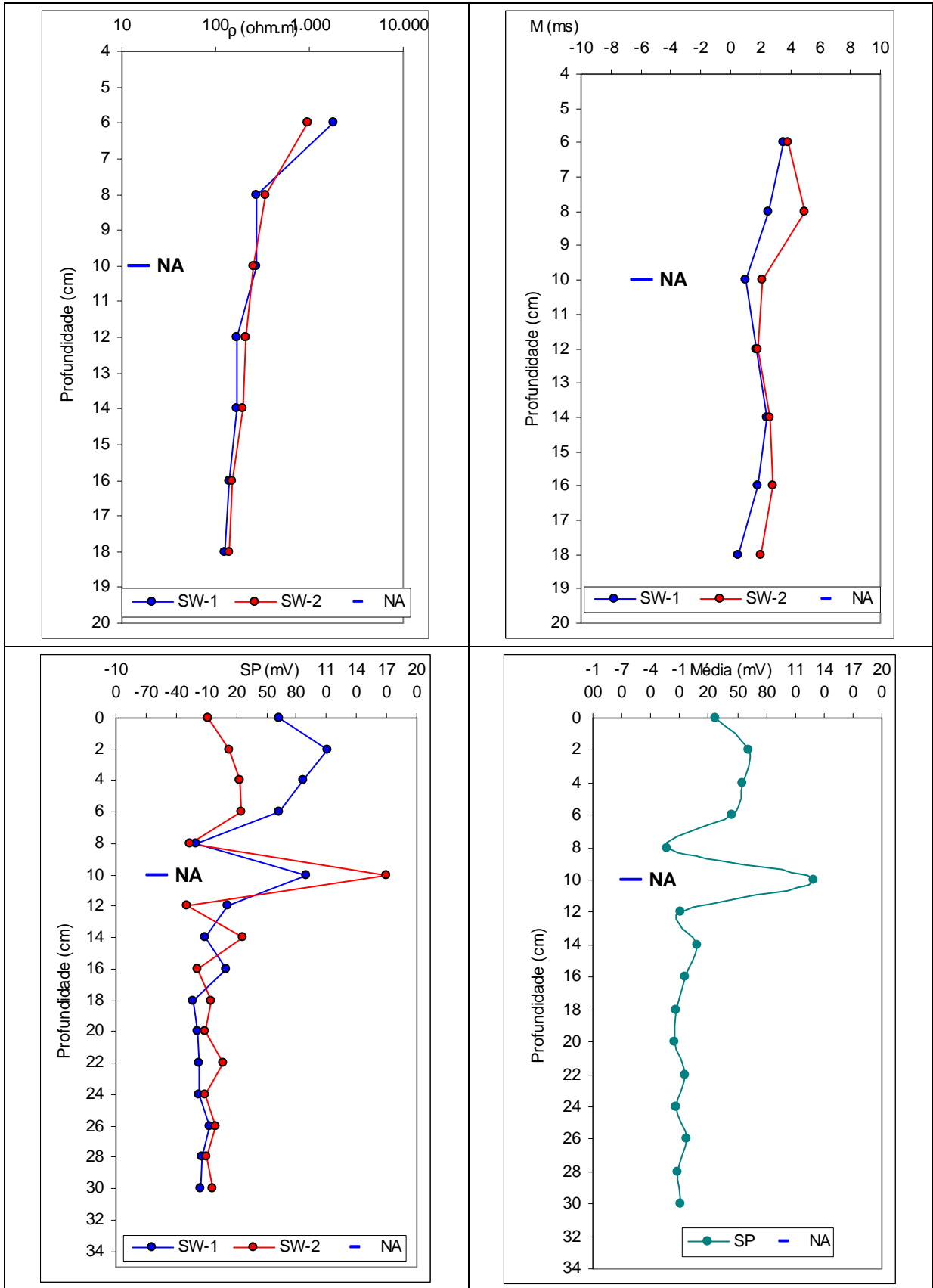


QUADRO B1 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – ensaio de referência (*background*)

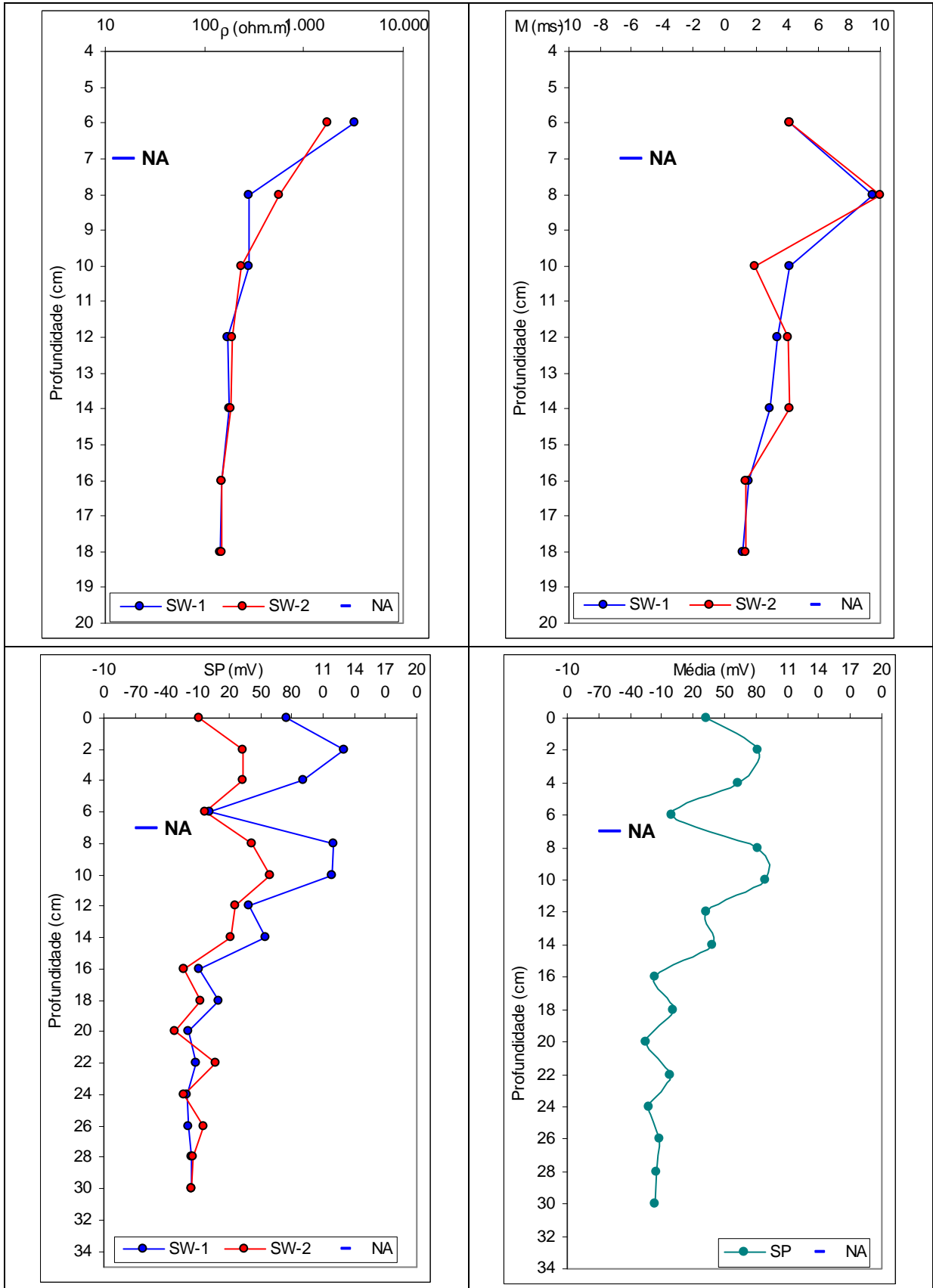


QUADRO B2 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 4 horas pós-contaminação

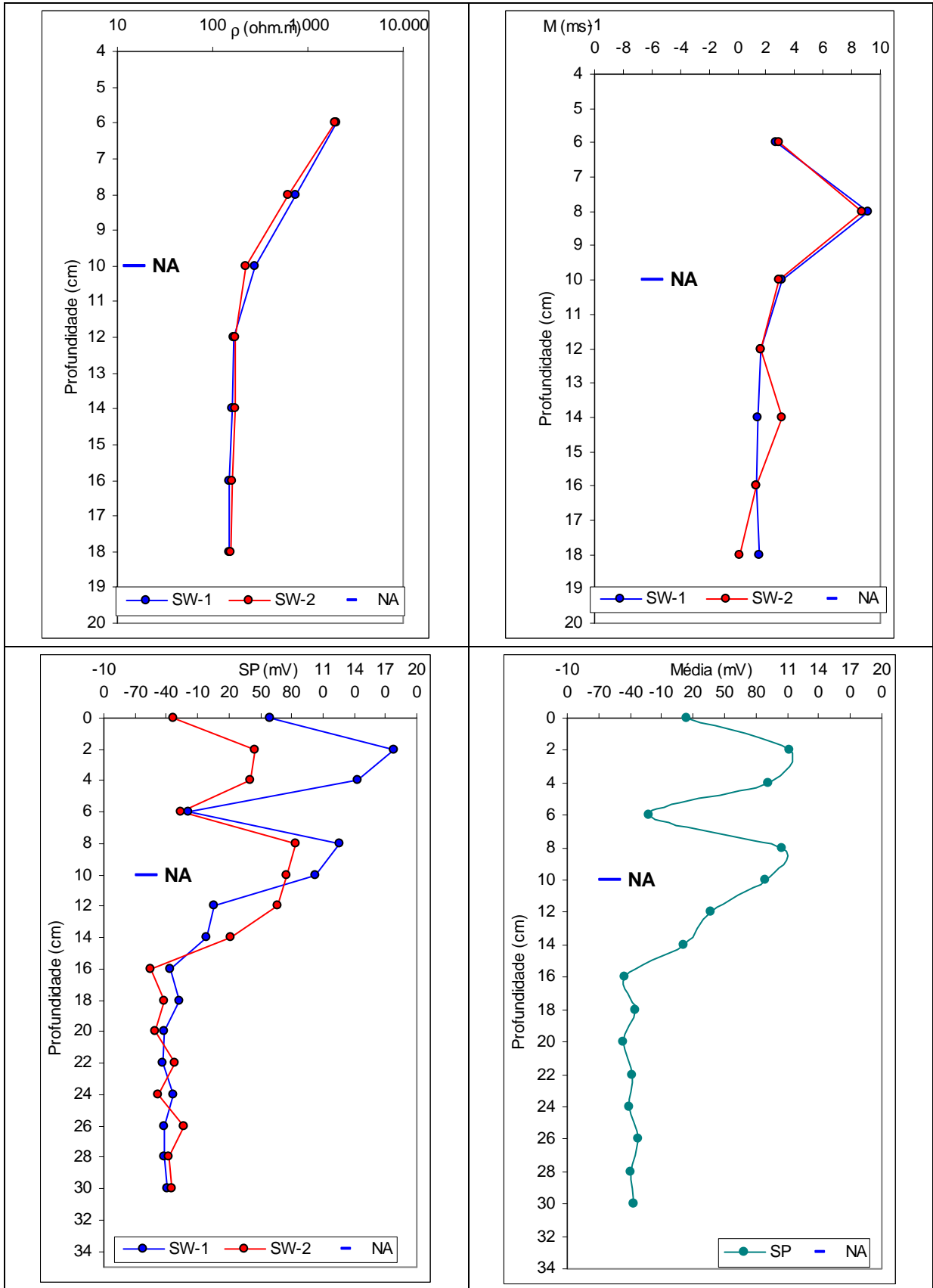




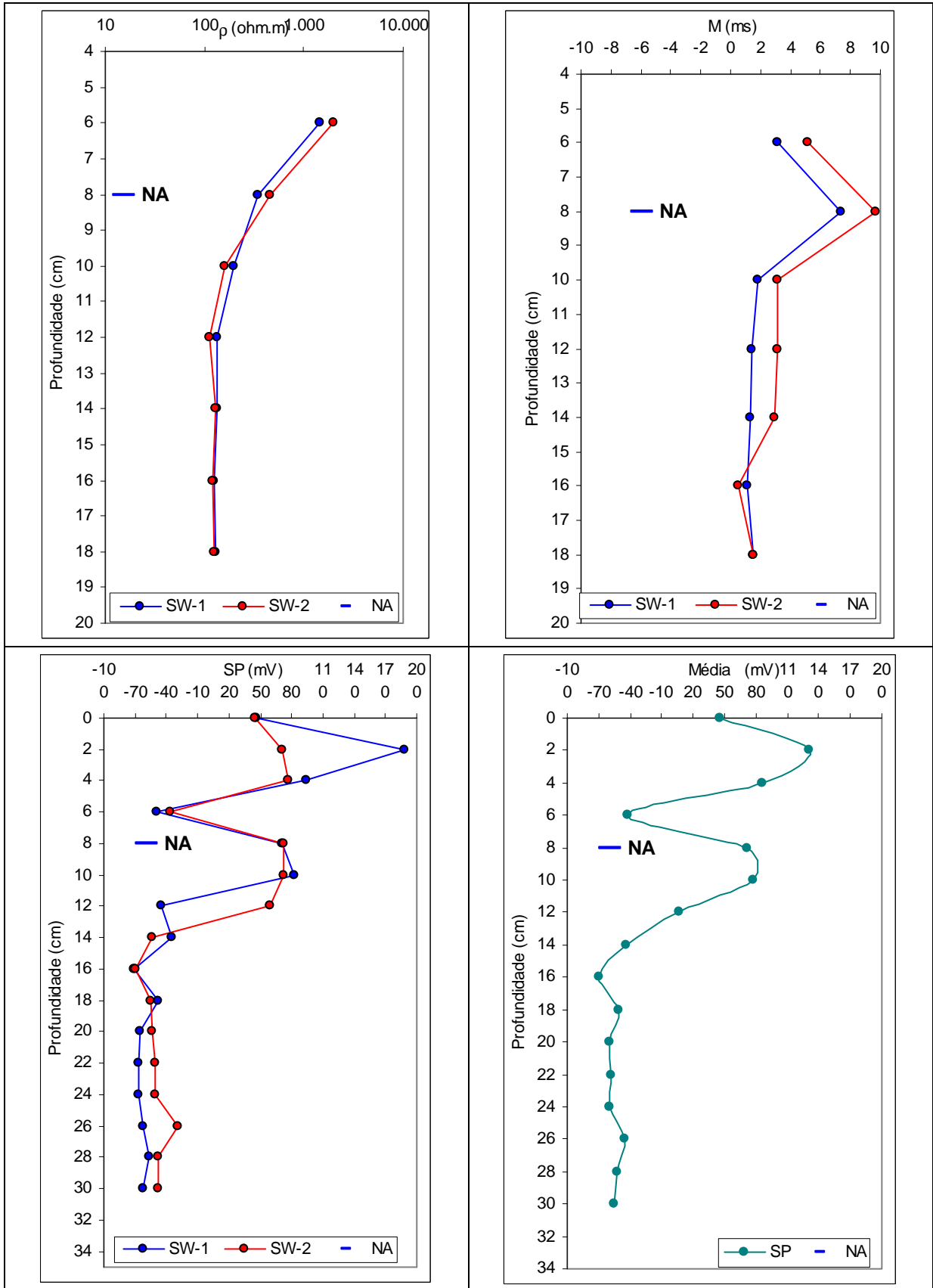
QUADRO B3 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 12 horas pós-contaminação



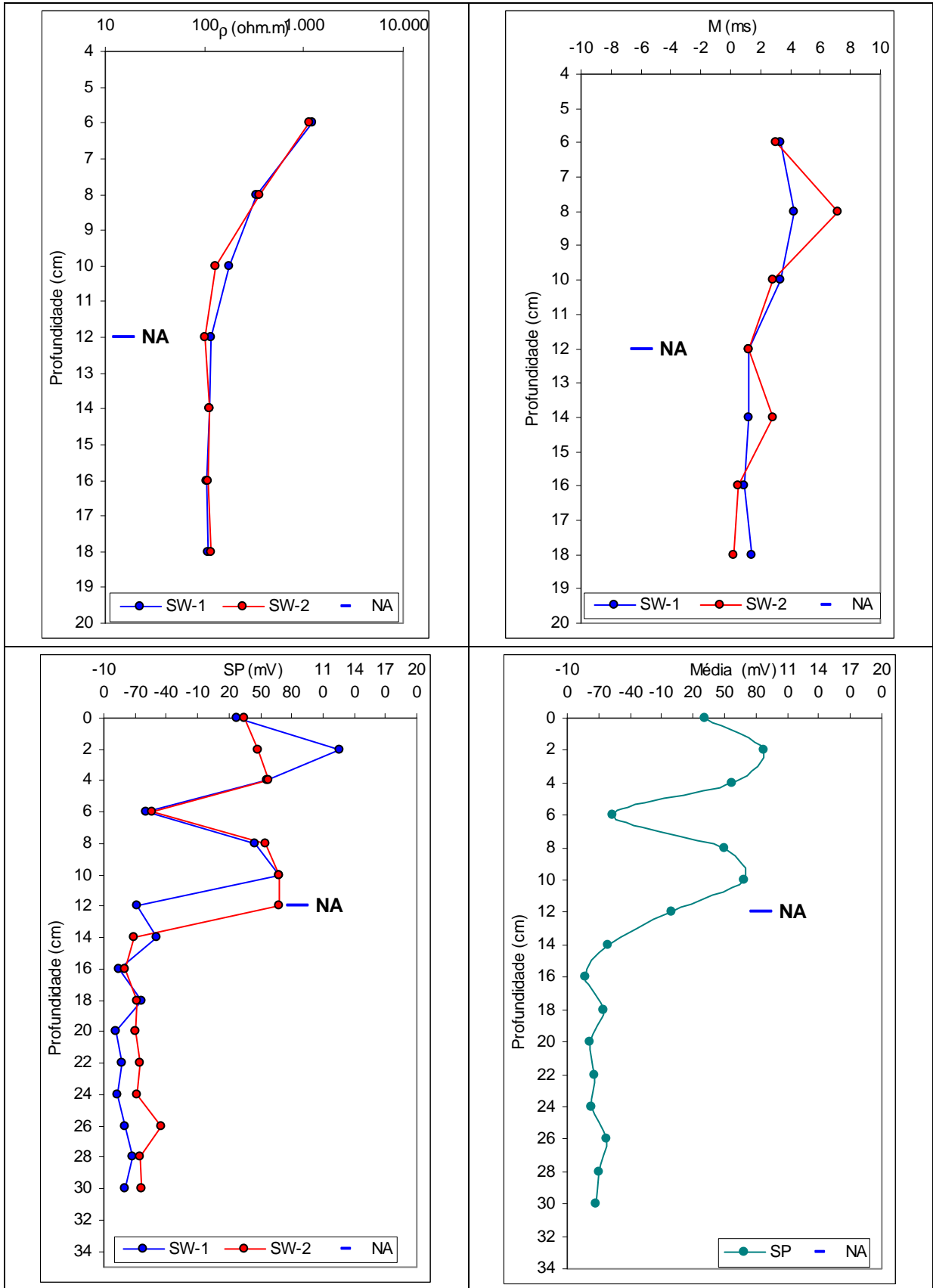
QUADRO B4 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 28 horas pós-contaminação



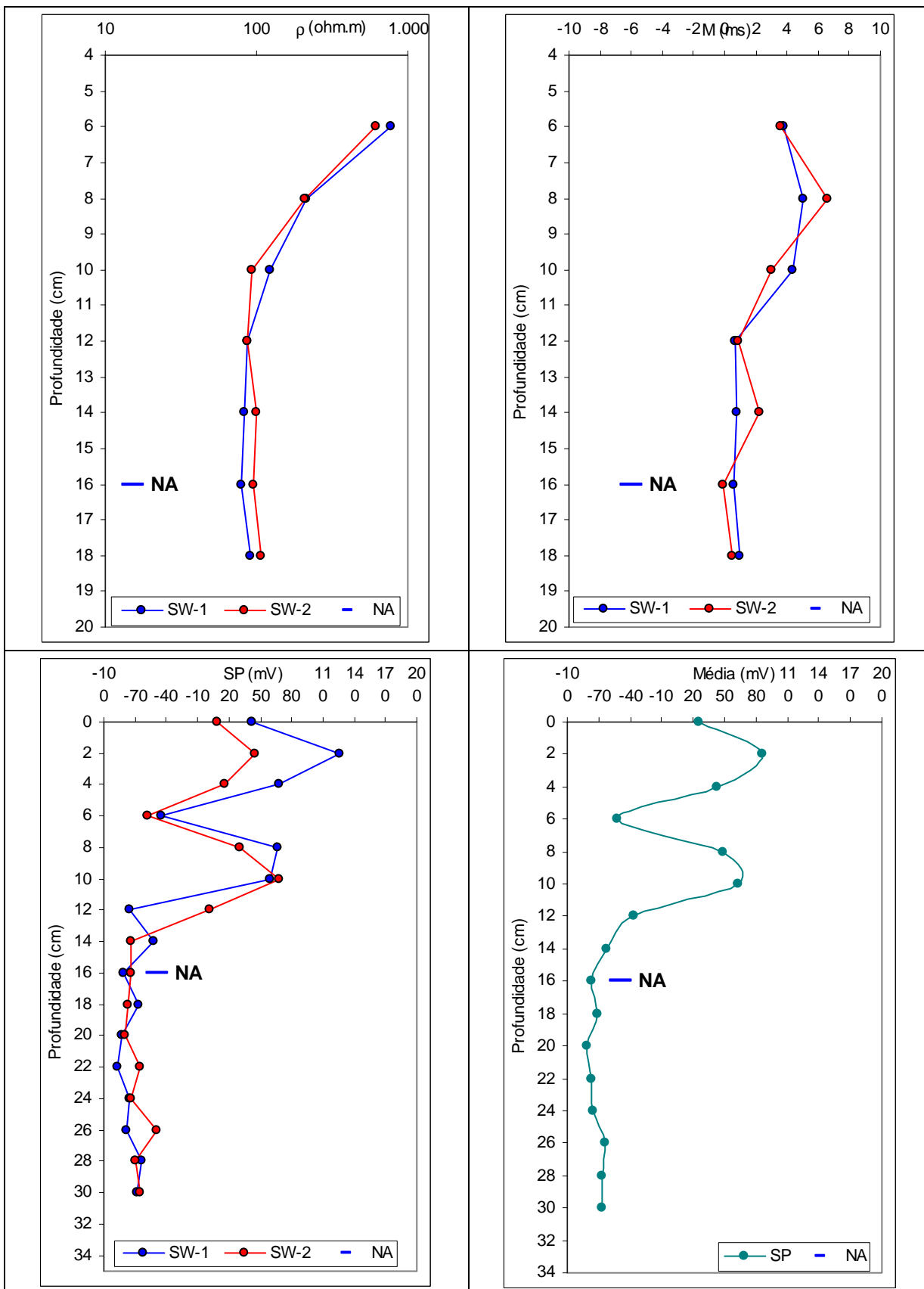
QUADRO B5 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 52 horas pós-contaminação



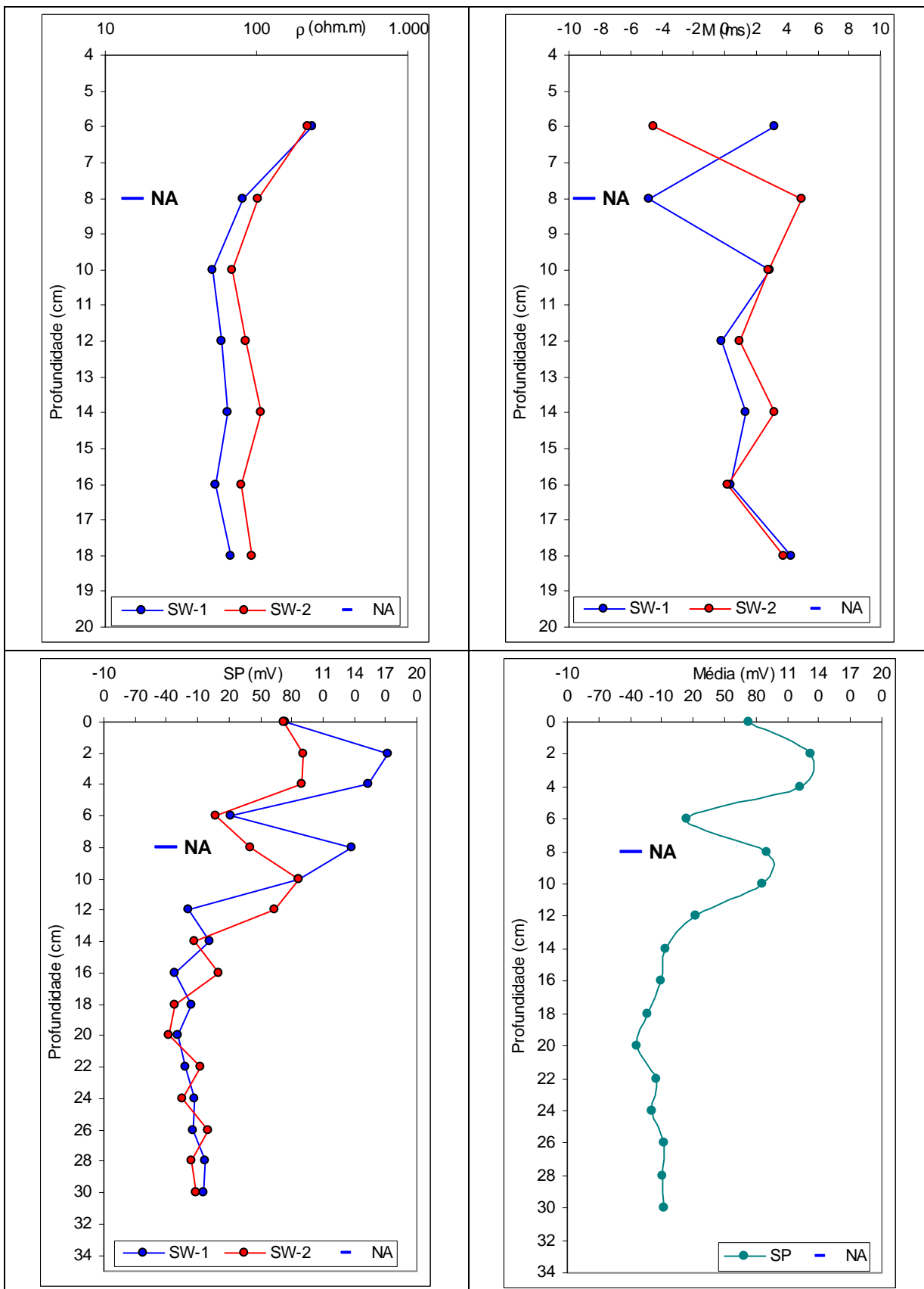
QUADRO B6 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 78 horas pós-contaminação



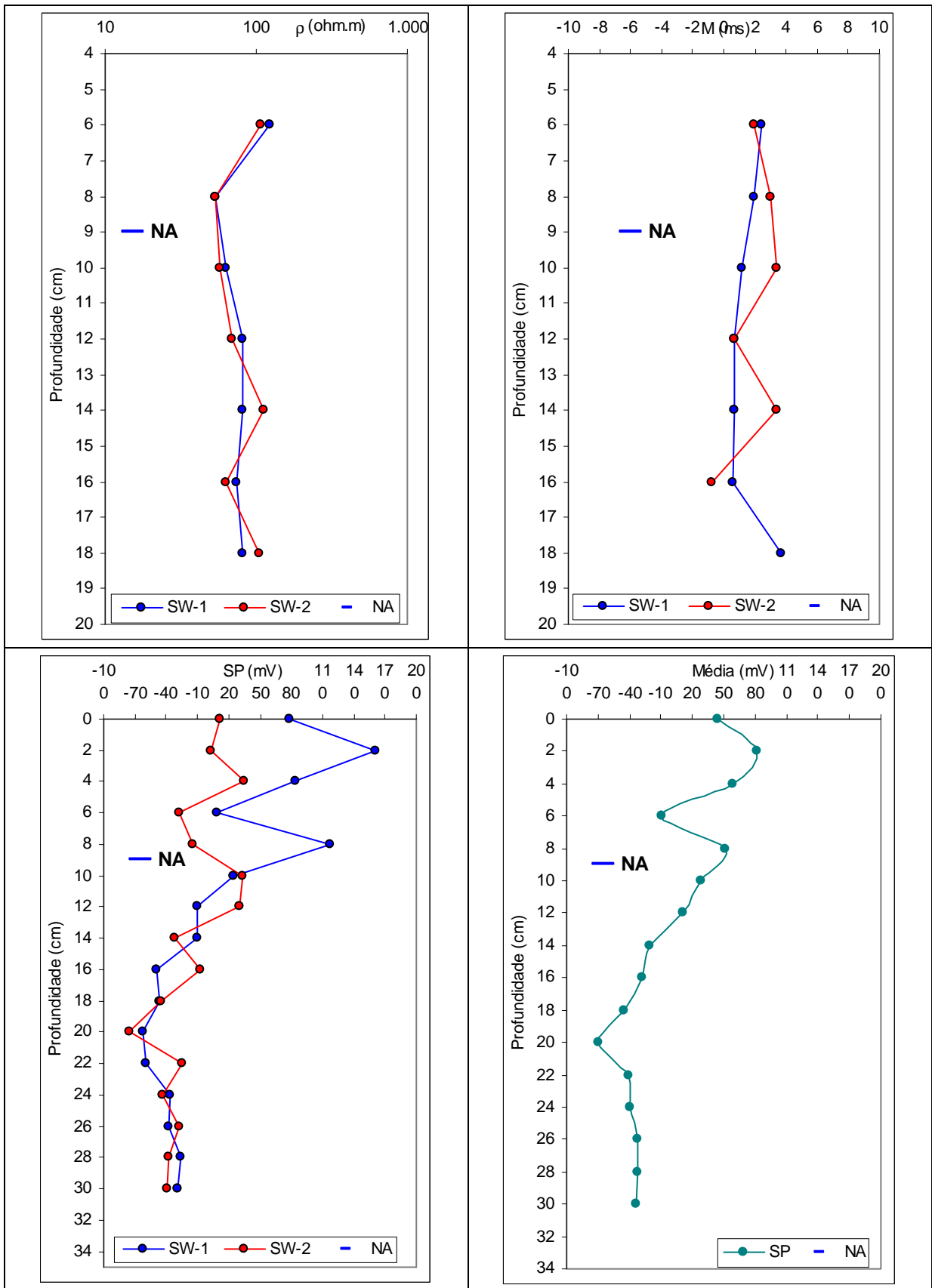
QUADRO B7 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 102 horas pós-contaminação



QUADRO B8 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 126 horas pós-contaminação

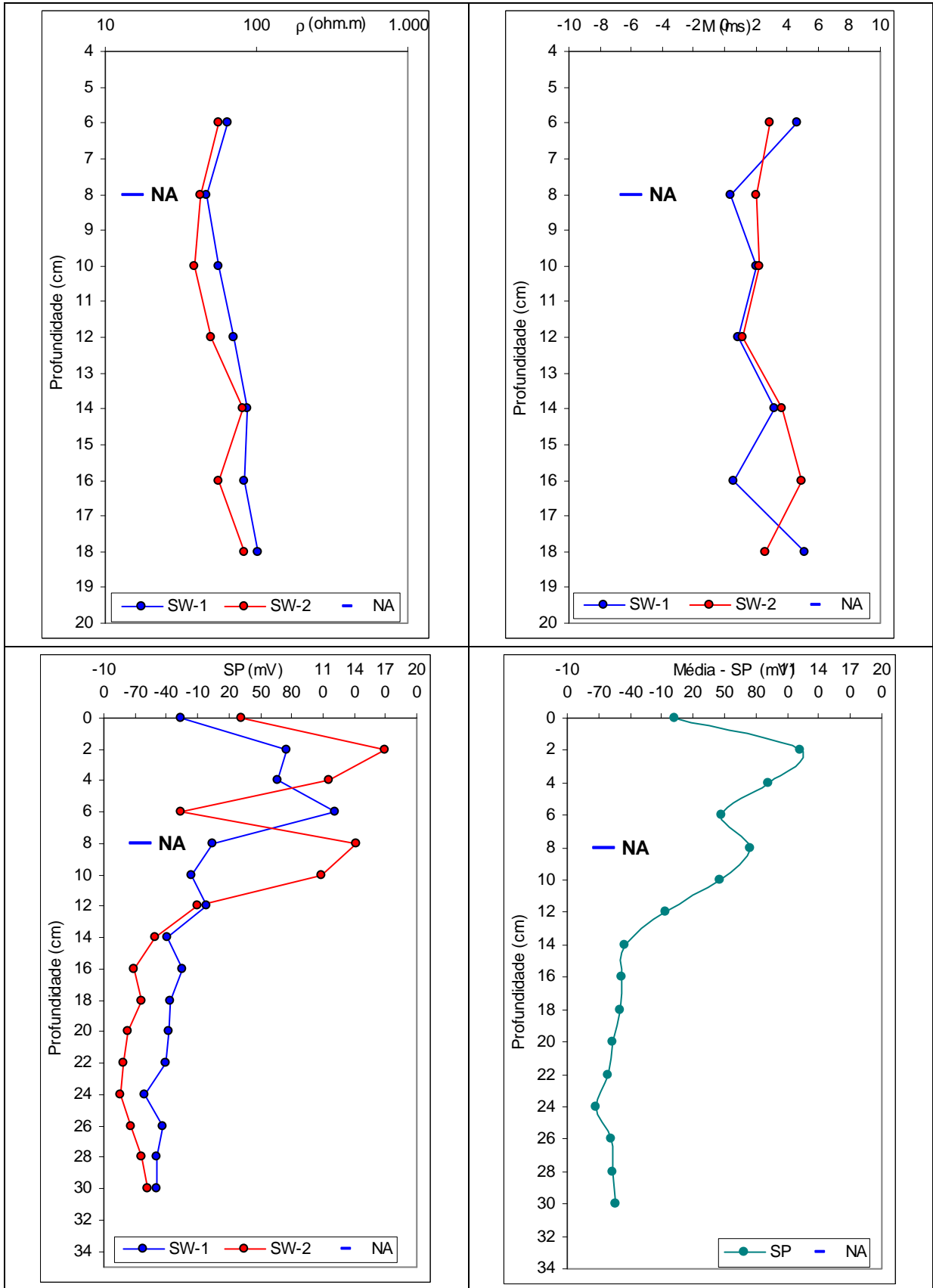


QUADRO B9 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 198 horas pós-contaminação

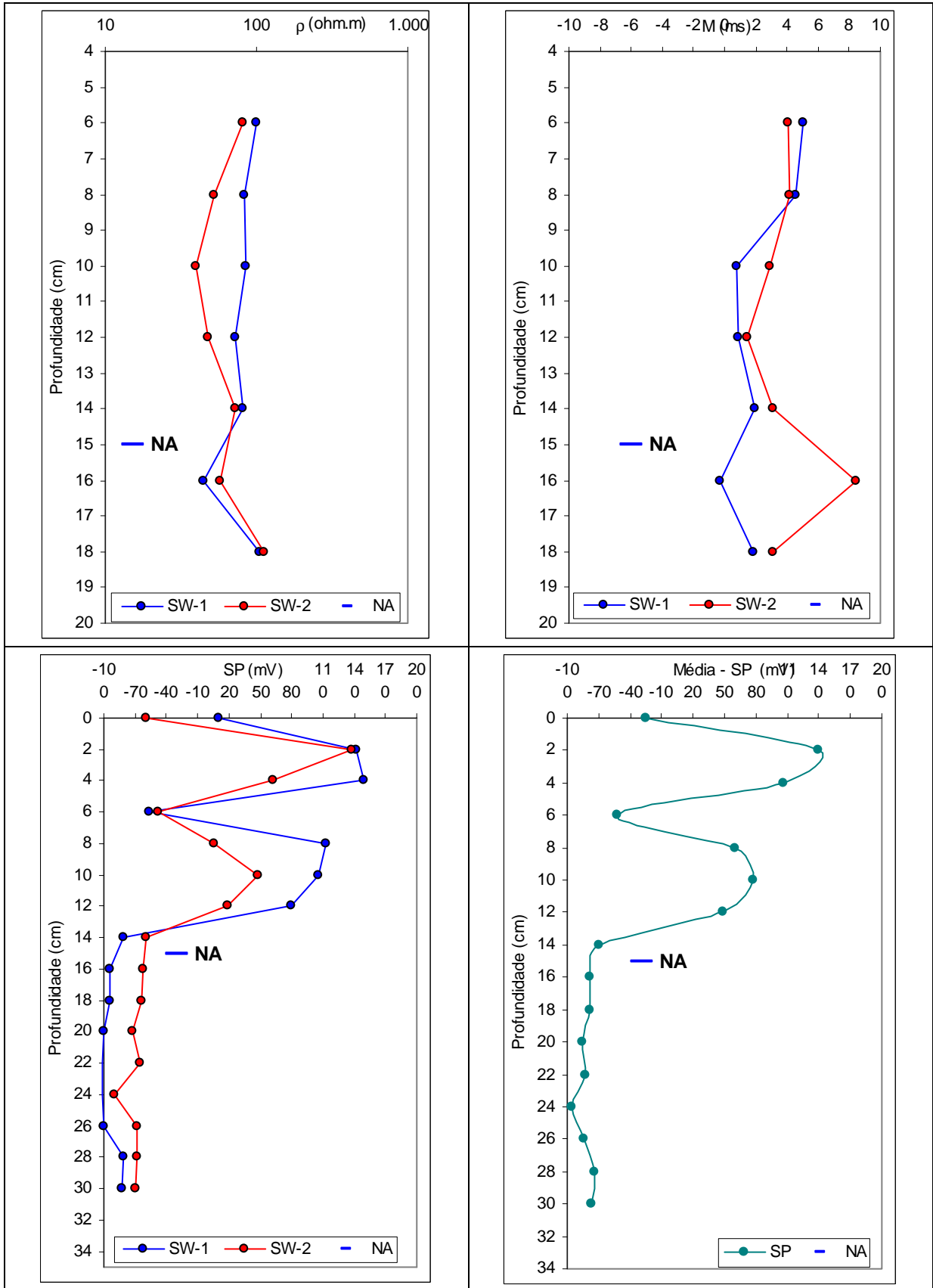


QUADRO B10 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 342 horas pós-contaminação

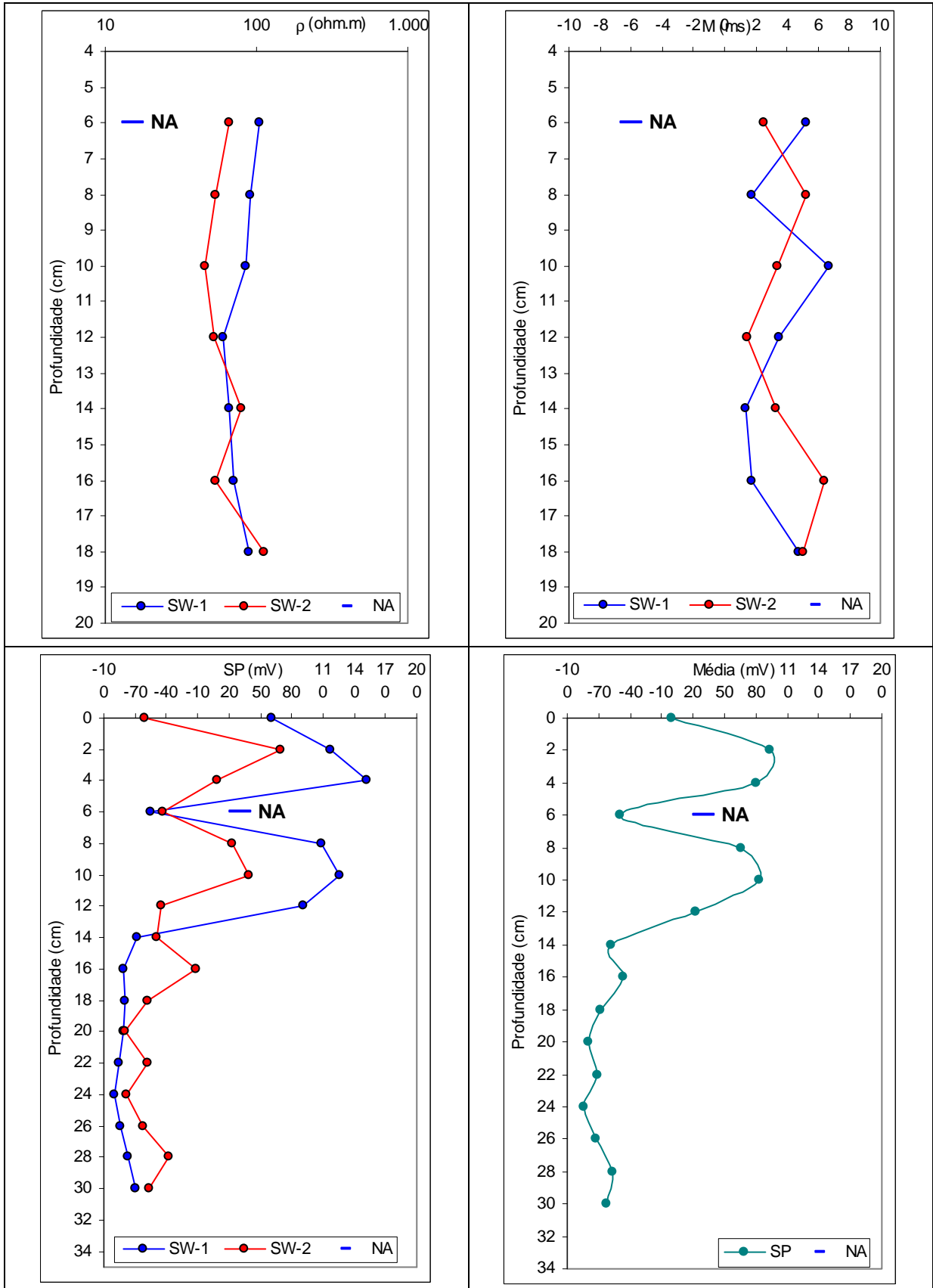




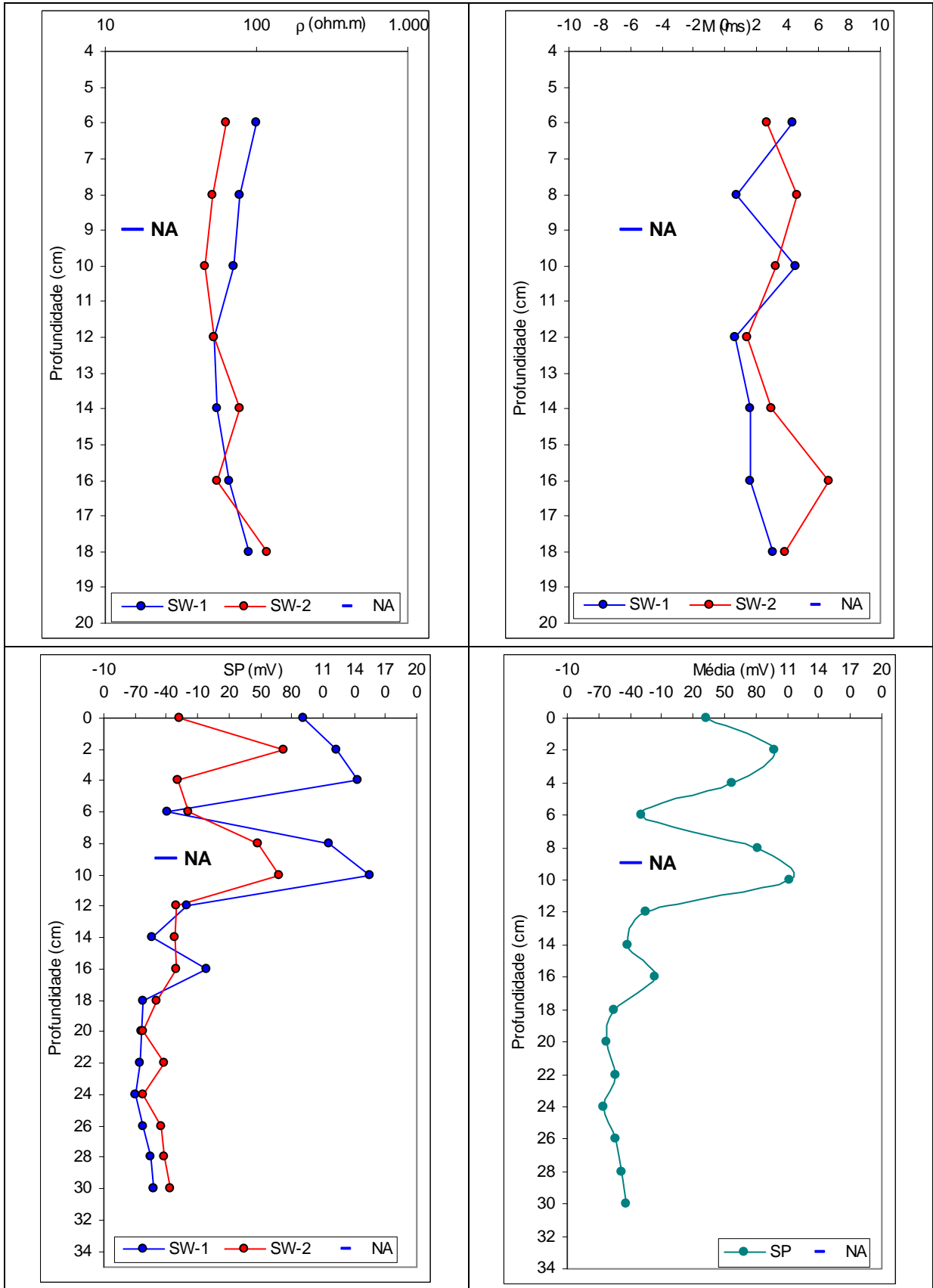
QUADRO B11 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 510 horas pós-contaminação



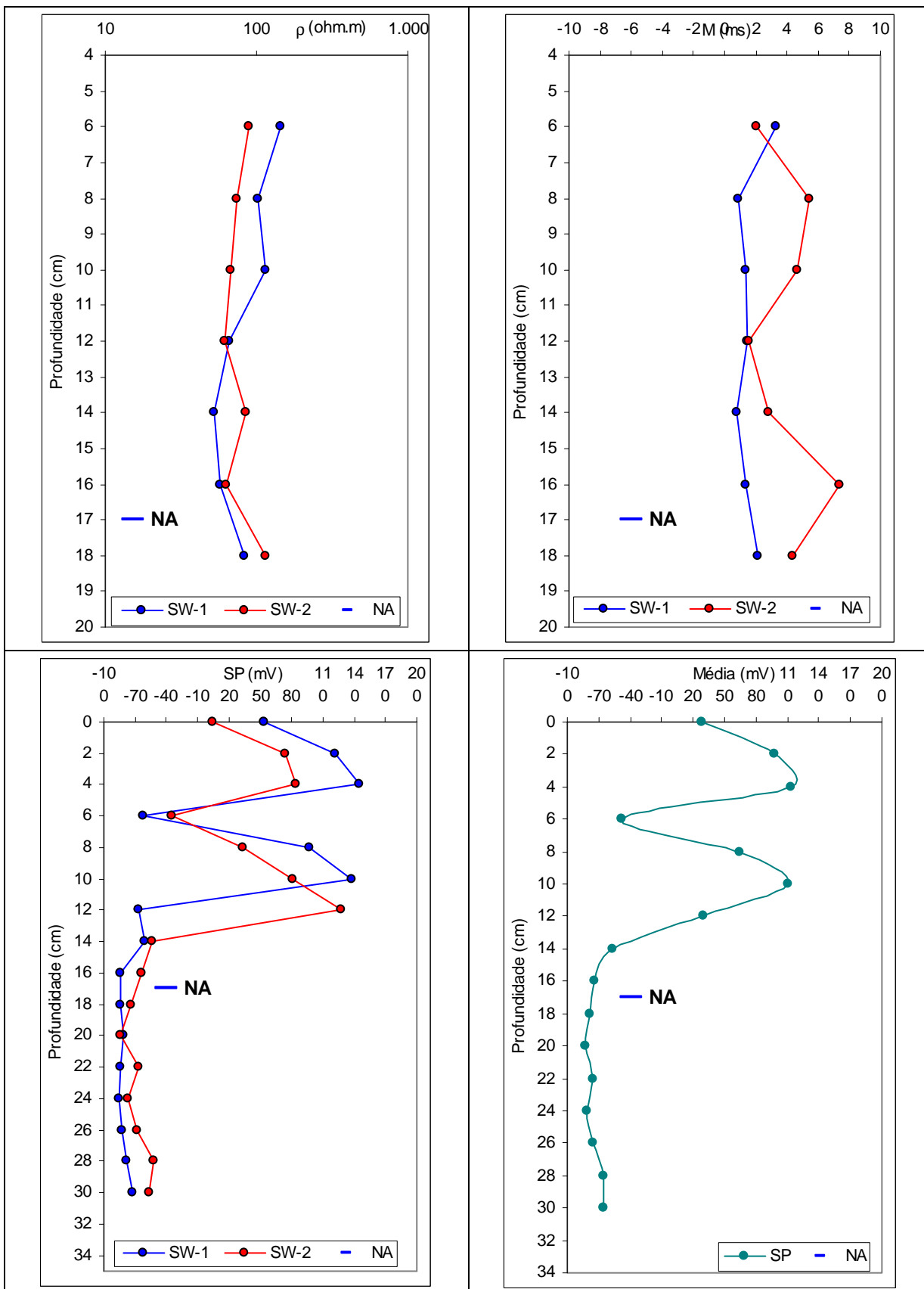
QUADRO B12 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 702 horas pós-contaminação



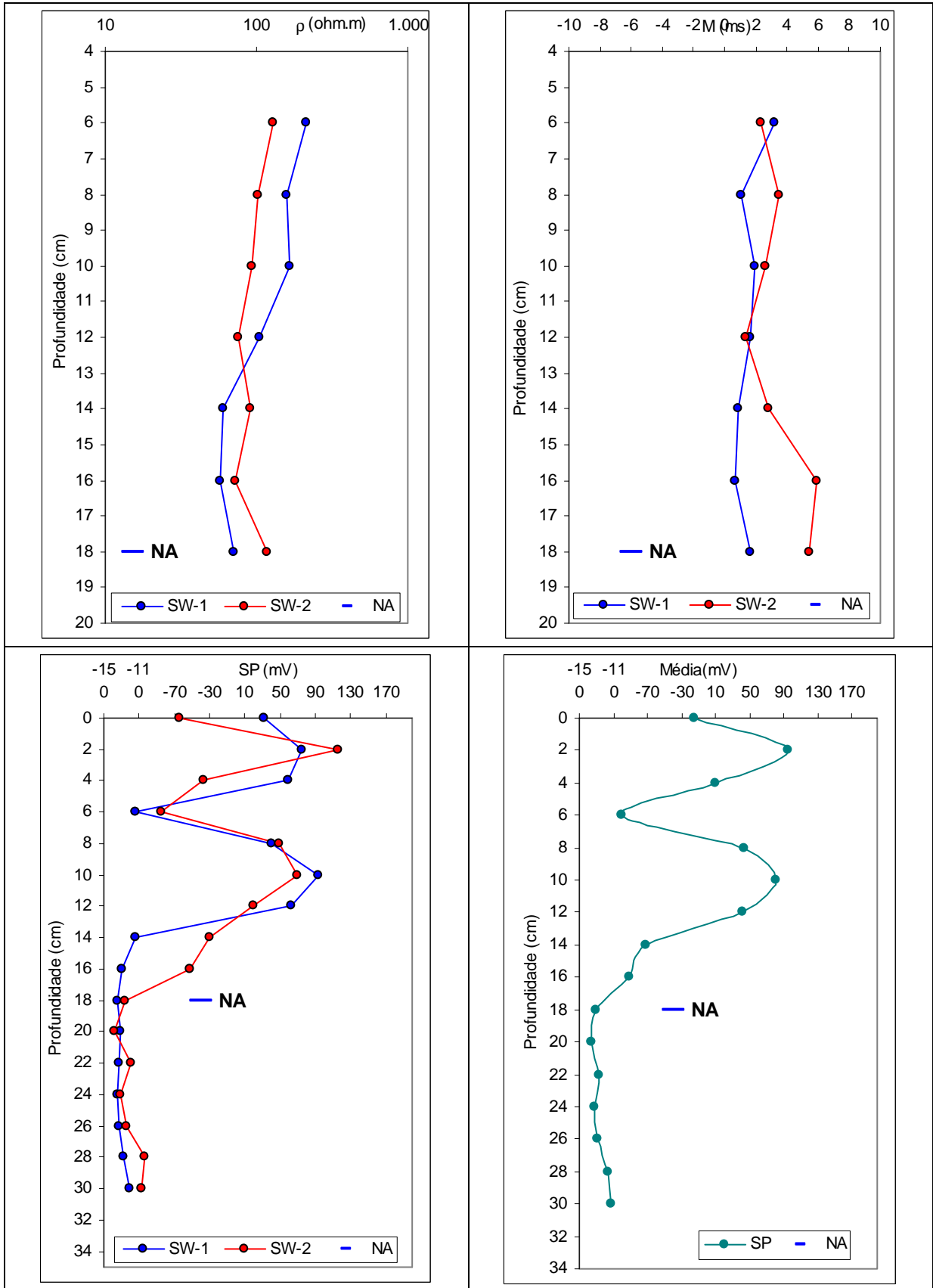
QUADRO B13 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 870 horas pós-contaminação



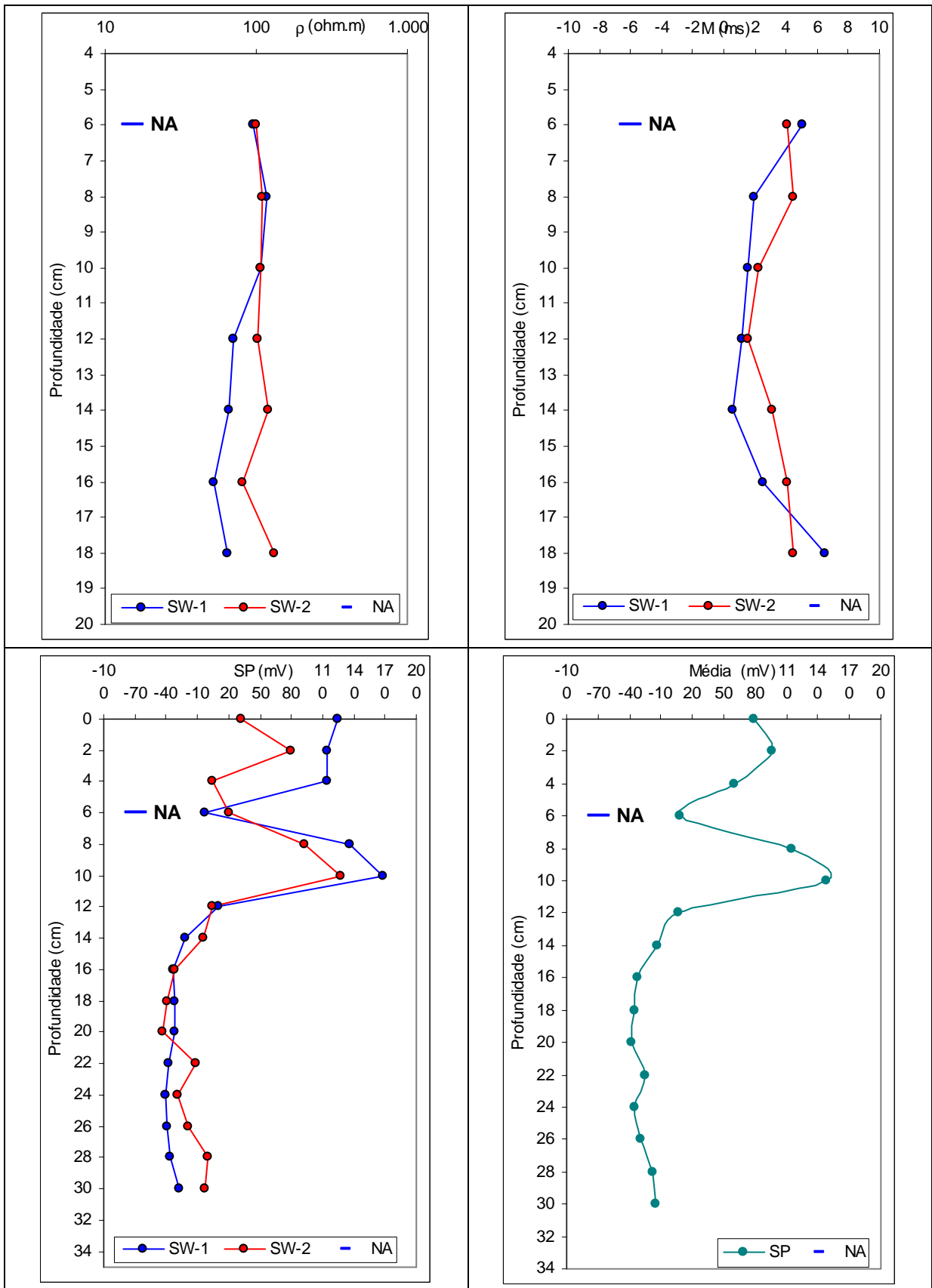
QUADRO B14 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 1038 horas pós-contaminação



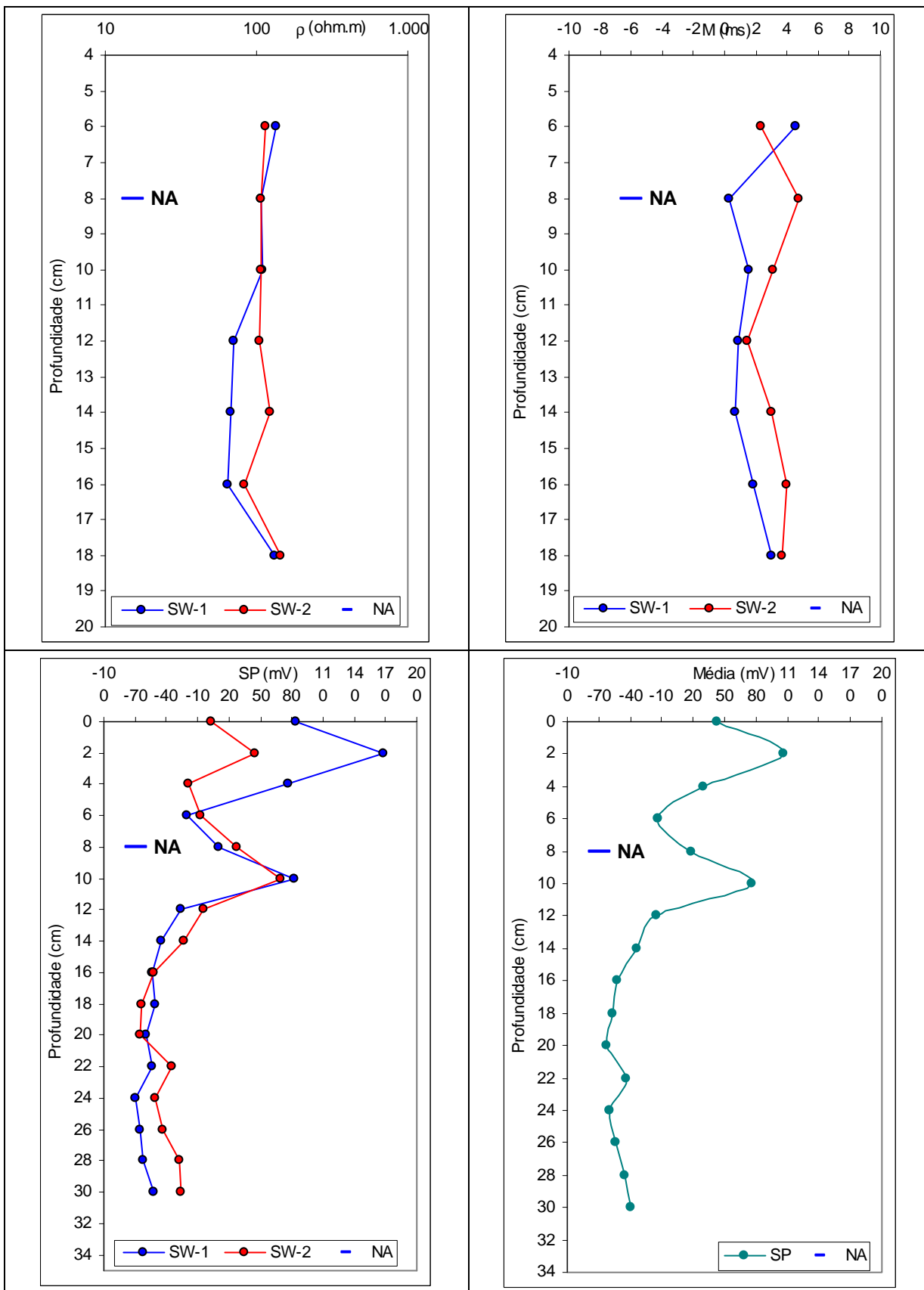
QUADRO B15 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 1158 horas pós-contaminação



QUADRO B16 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 1326 horas pós-contaminação

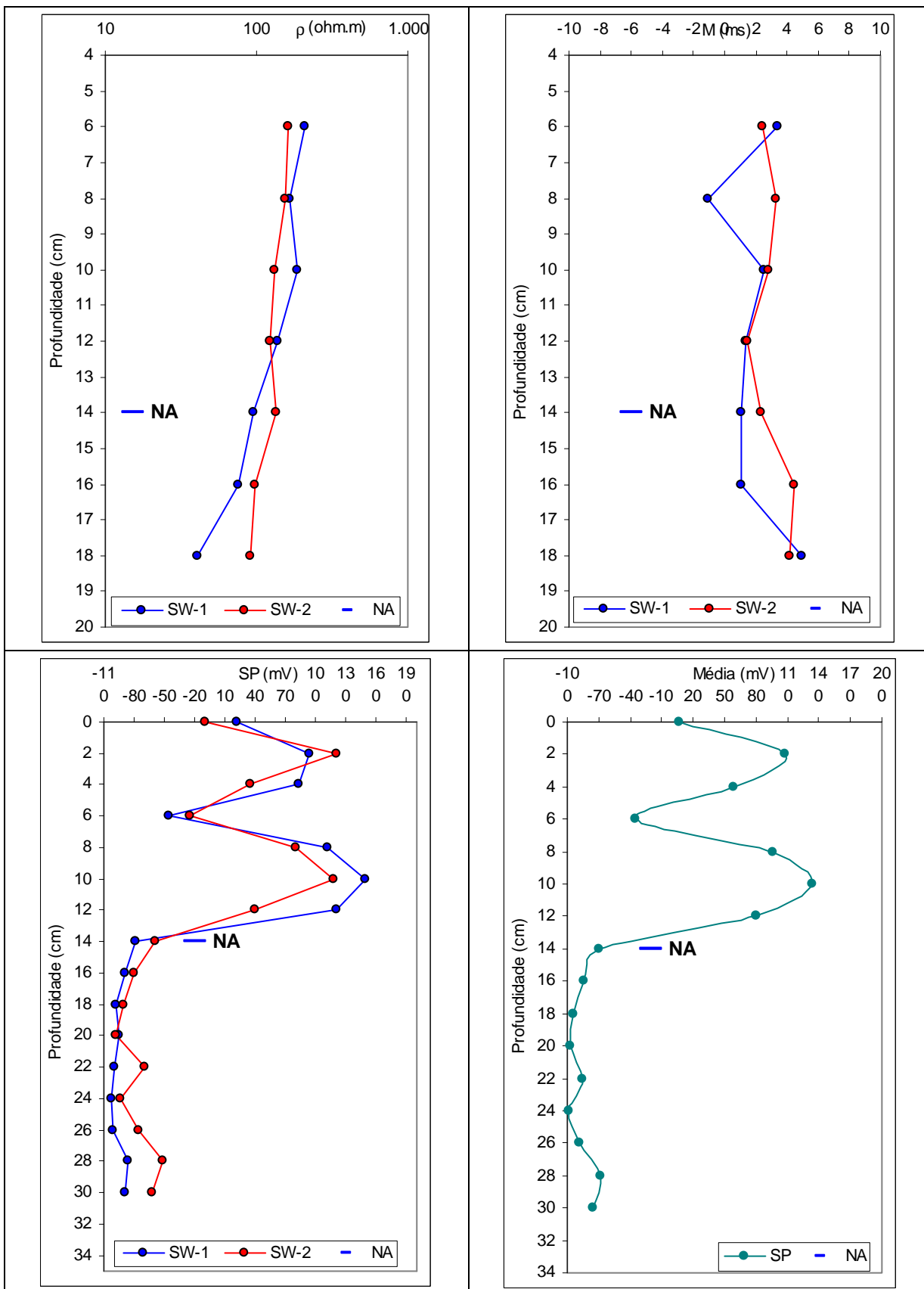


QUADRO B17 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 1470 horas pós-contaminação

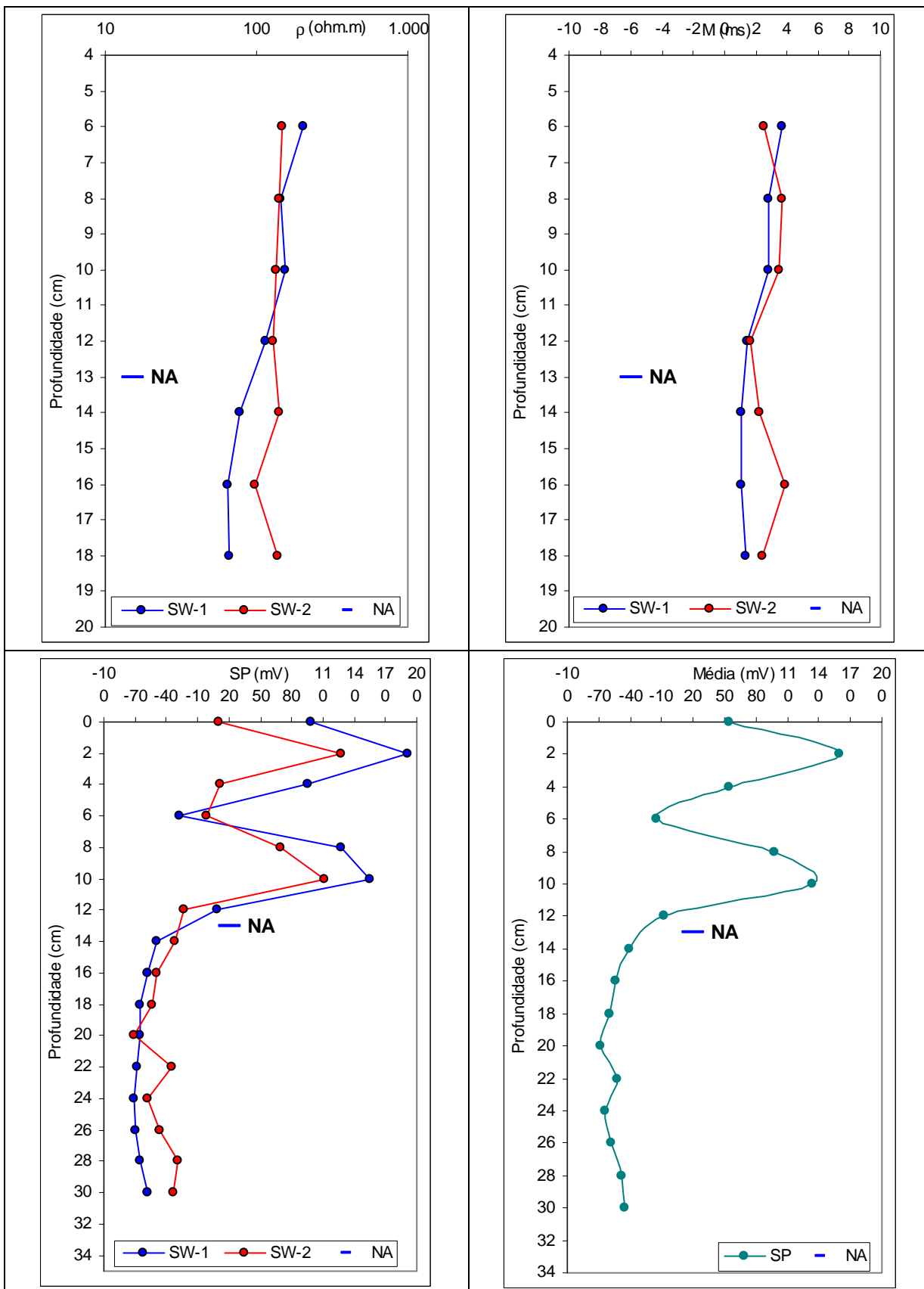


QUADRO B18 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 1590 horas pós-contaminação

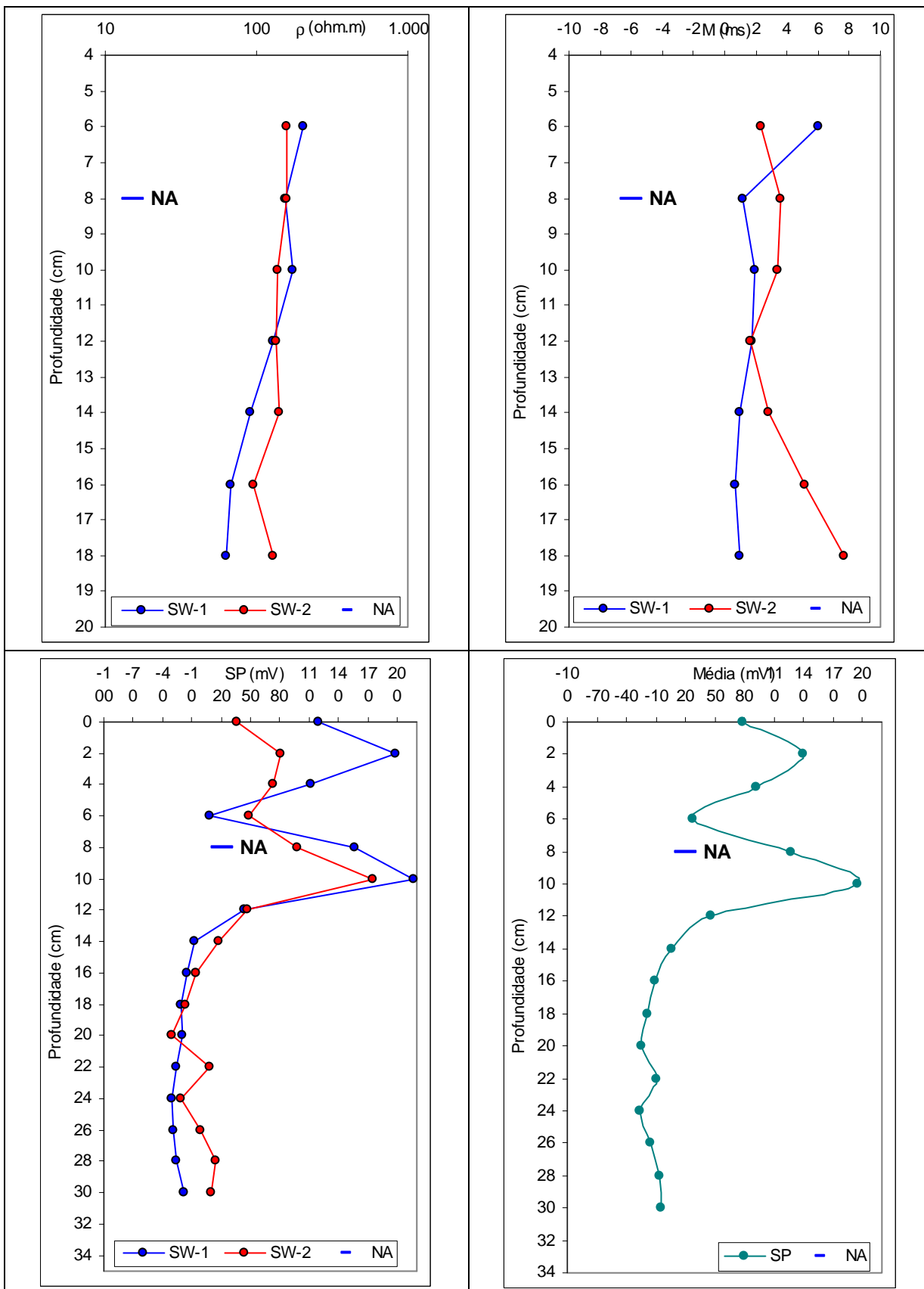




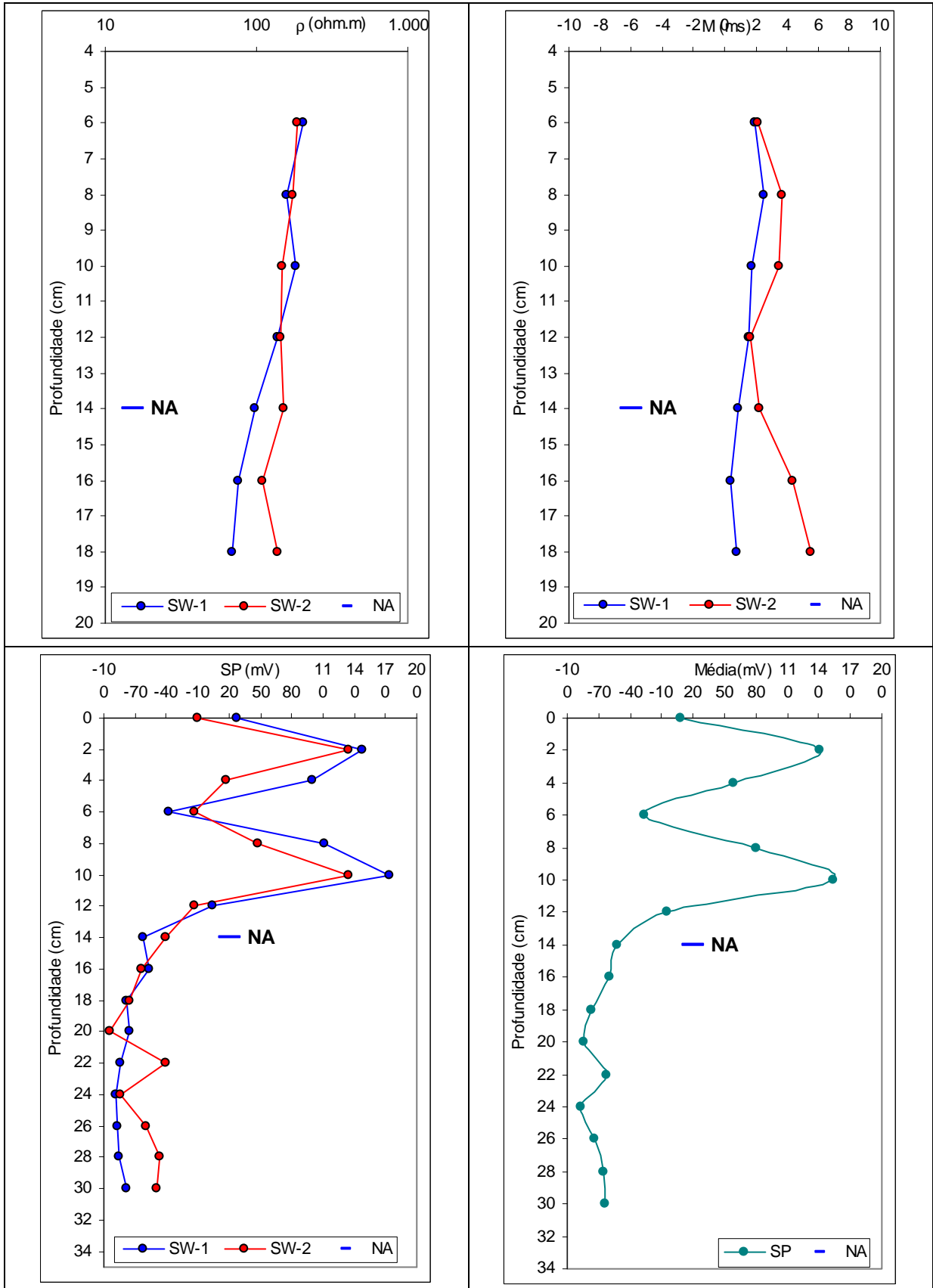
QUADRO B19 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 1758 horas pós-contaminação



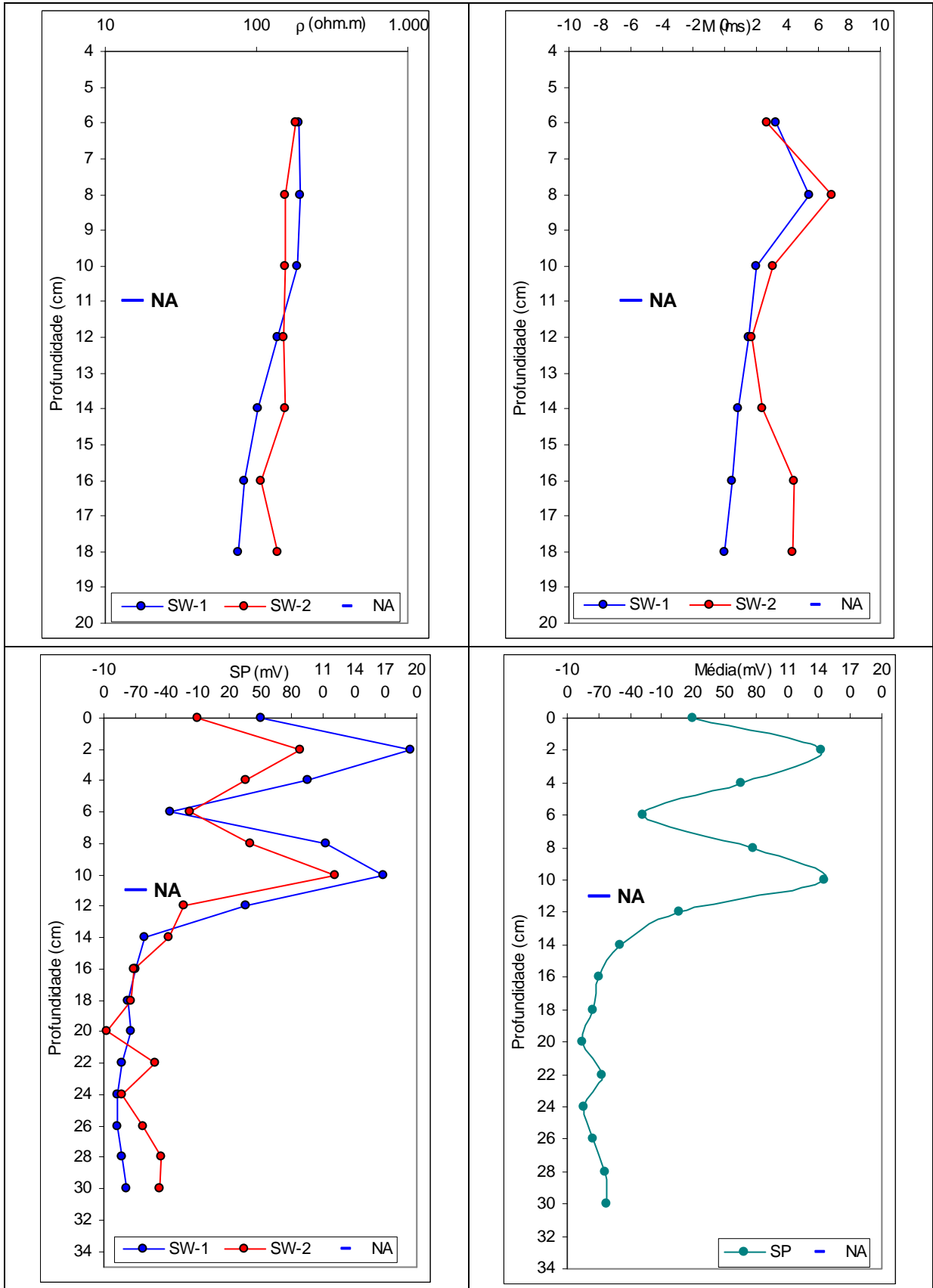
QUADRO B20 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 1878 horas pós-contaminação



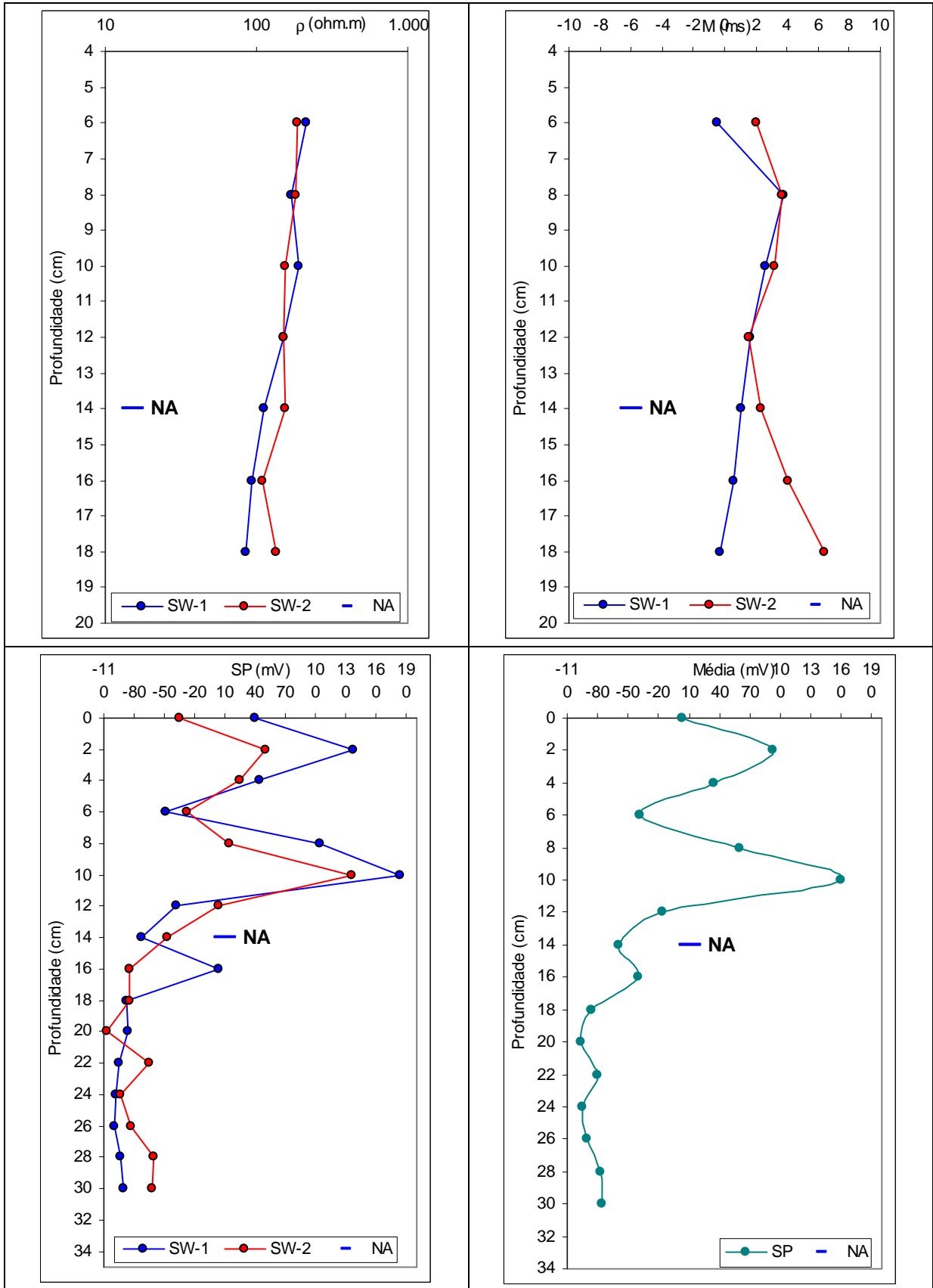
QUADRO B21 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 2070 horas pós-contaminação



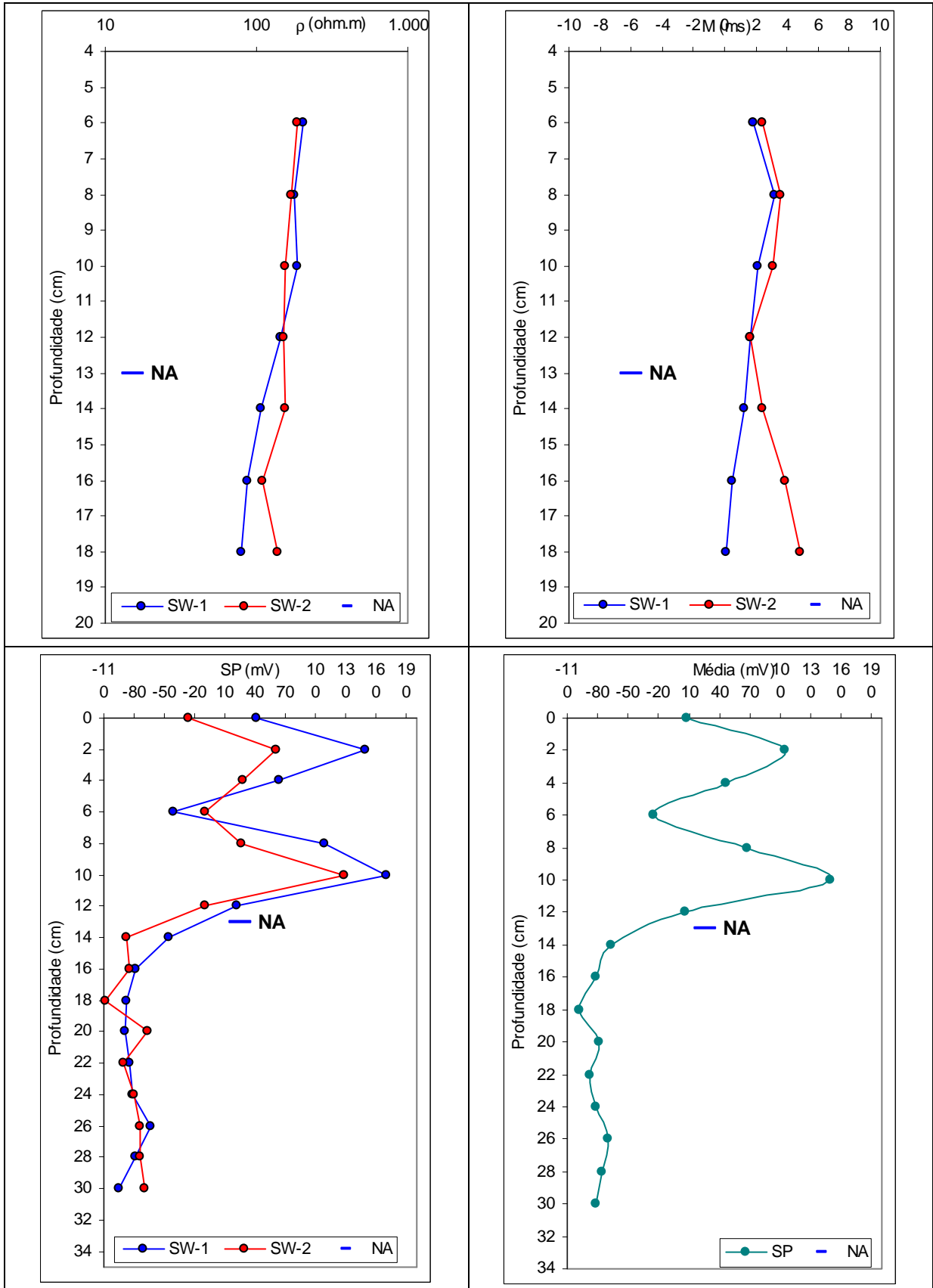
QUADRO B22 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 2238 horas pós-contaminação



QUADRO B23 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 2406 horas pós-contaminação



QUADRO B24 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 2547 horas pós-contaminação



QUADRO B25 – Curvas de resistividade e cargabilidade (acima), curvas de SP e média de SP (abaixo) – 2742 horas pós-contaminação

**- APÊNDICE C –**

-

- **DISPERSÃO DE VARIÁVEIS – RESISTIVIDADE E CARGABILIDADE - CAMINHAMENTOS ELÉTRICOS**

-

- **DISPERSÃO DE VARIÁVEIS – POTENCIAL ESPONTÂNEO – PERFILAGENS ELÉTRICAS**



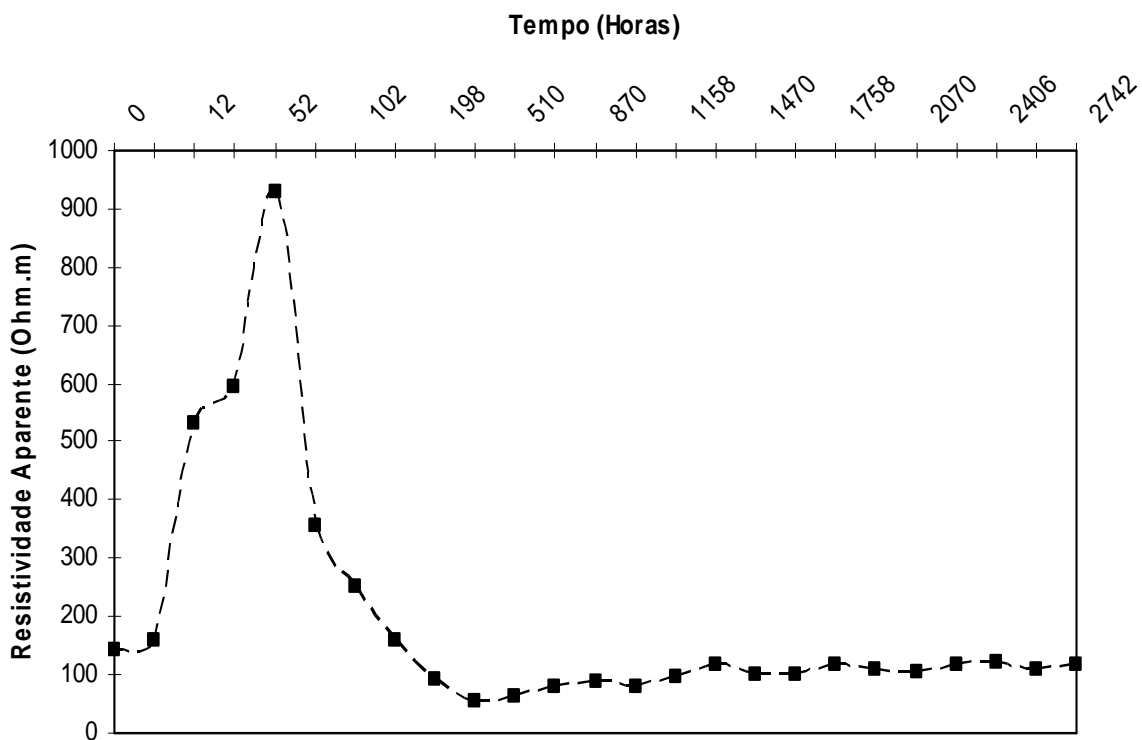


GRÁFICO C1 – Dispersão de resistividade no nível Ni-01 (2,6 cm)

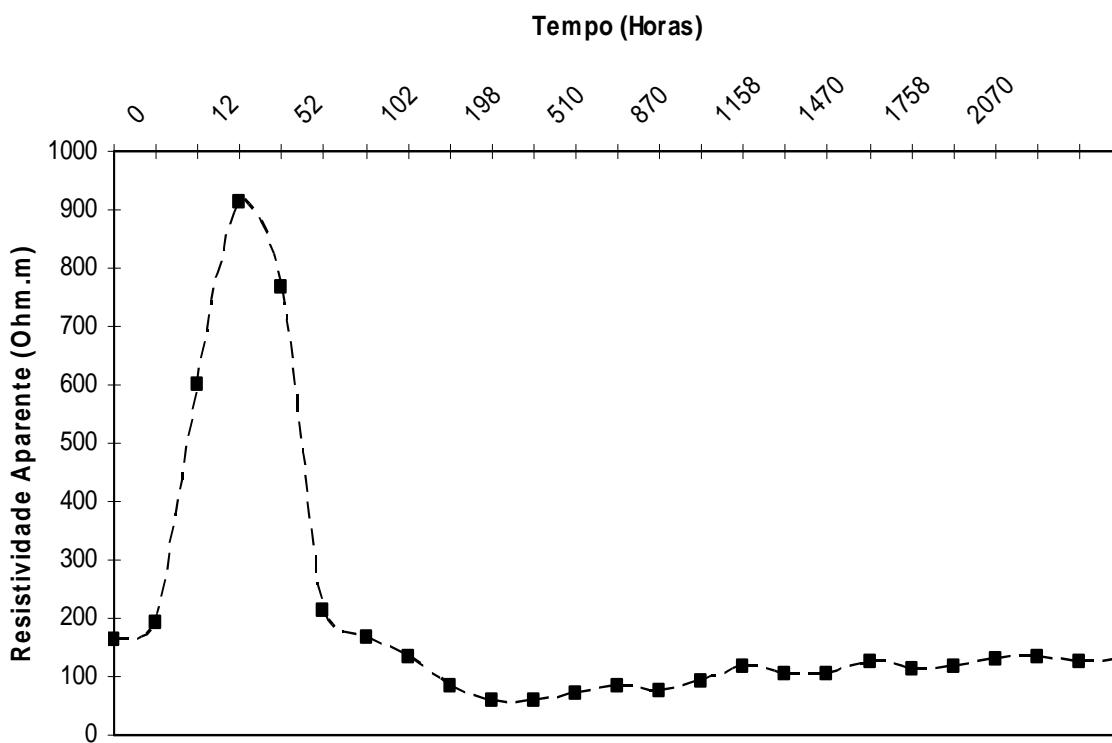


GRÁFICO C2 – Dispersão de resistividade no nível Ni-02 (7,7 cm)

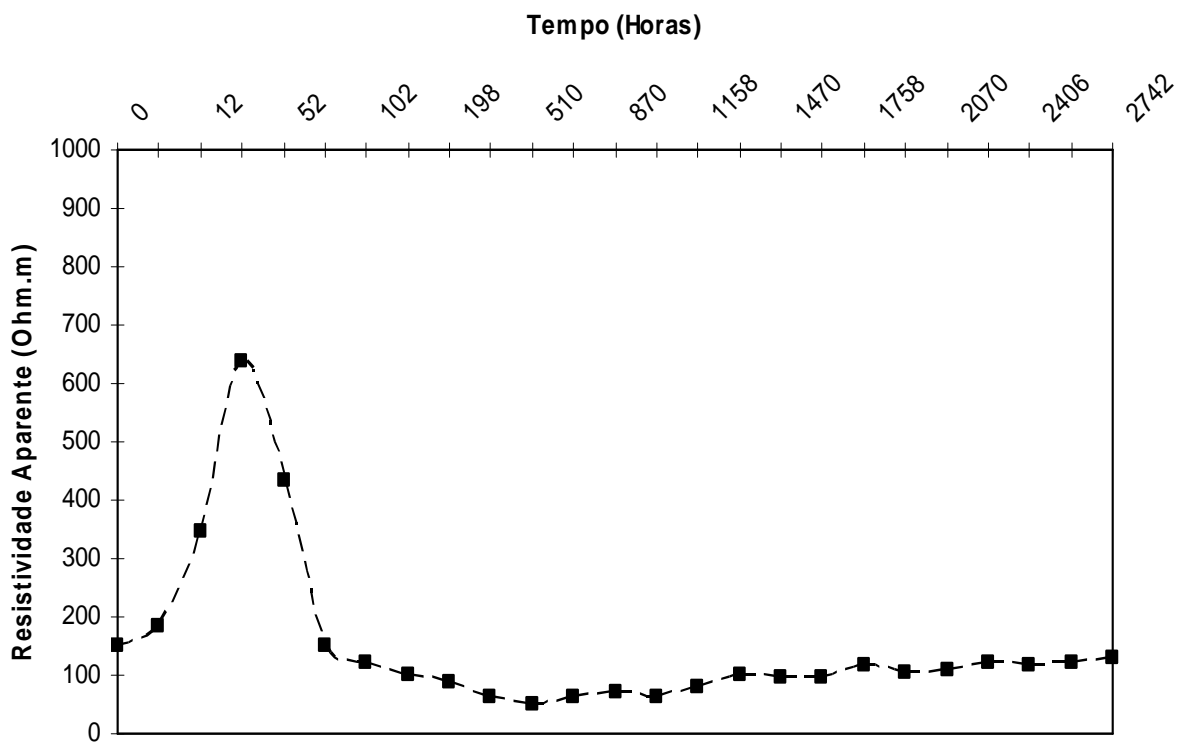


GRÁFICO C3 – Dispersão de resistividade no nível Ns-01 (13,1 cm)

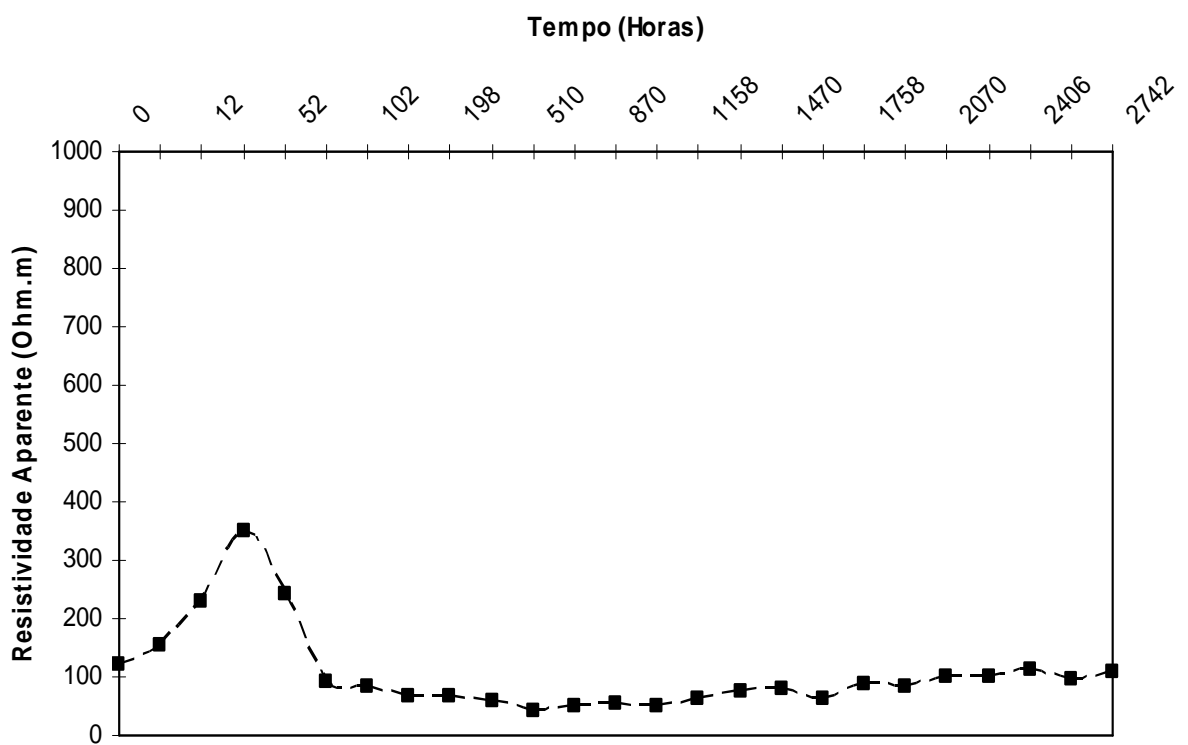


GRÁFICO C4 – Dispersão de resistividade no nível Ns-02 (19,0 cm)

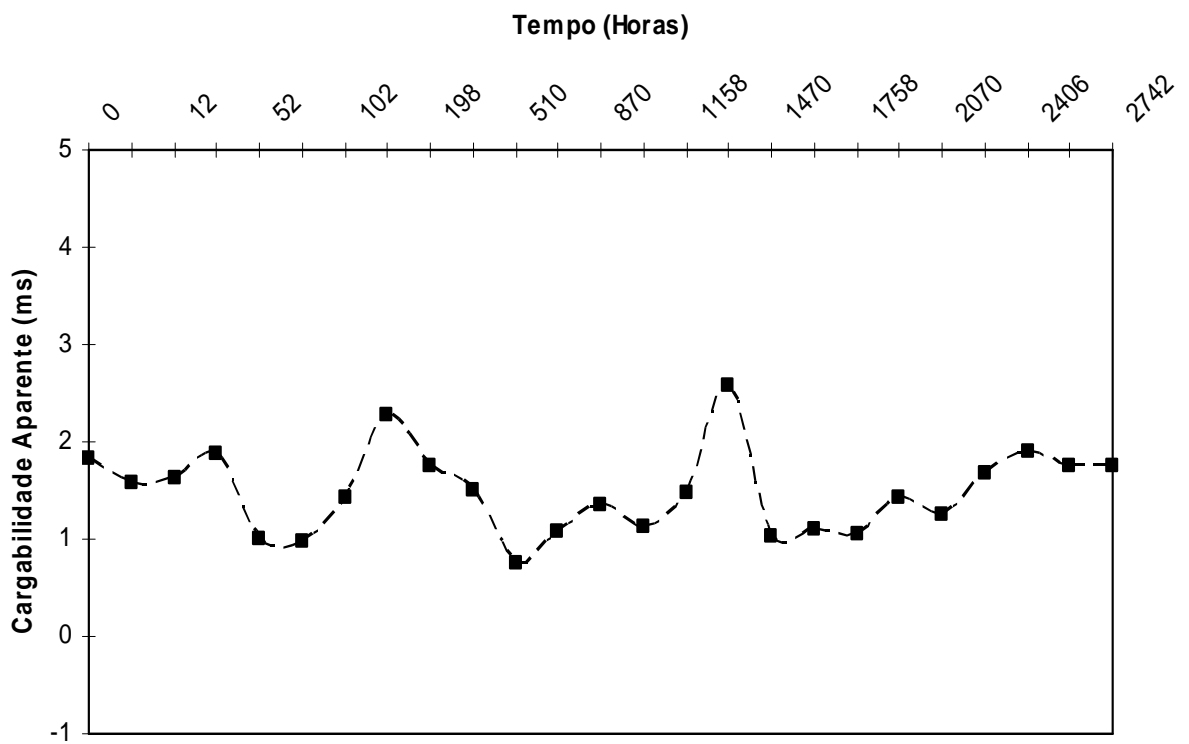


GRÁFICO C5 – Dispersão de cargaabilidade no nível Ni-01 (2,6 cm)

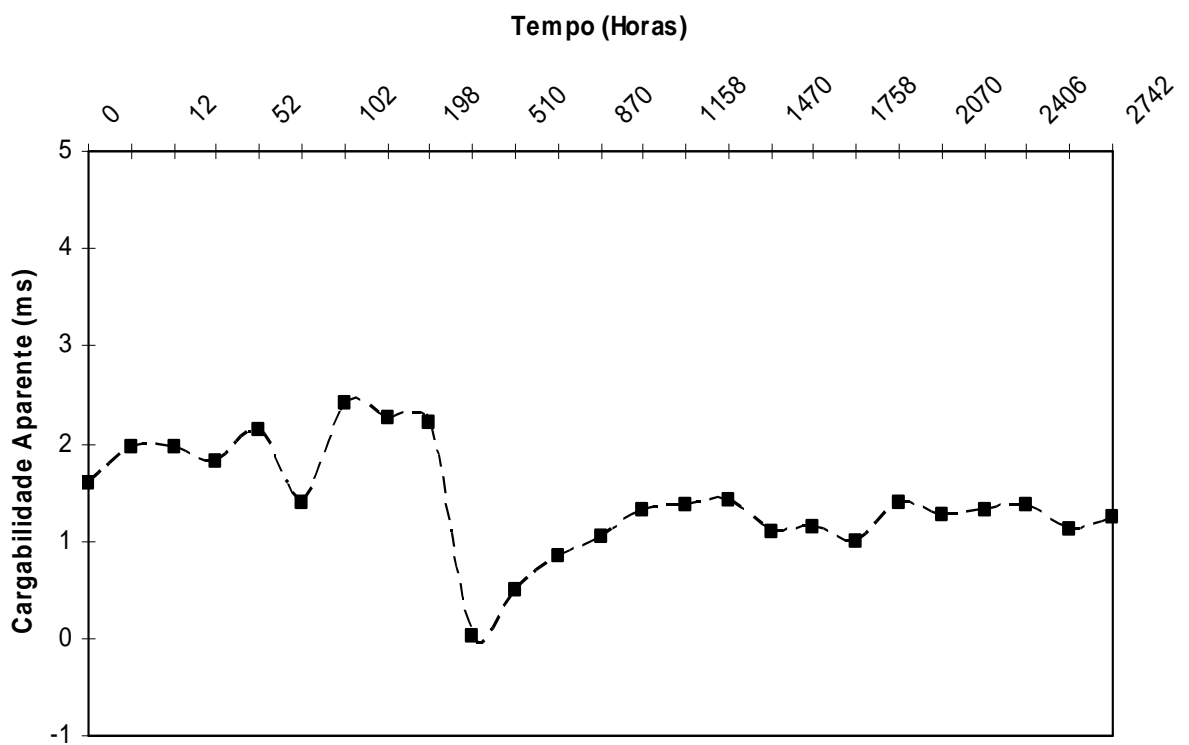


GRÁFICO C6 – Dispersão de cargaabilidade no nível Ni-02 (7,7 cm)

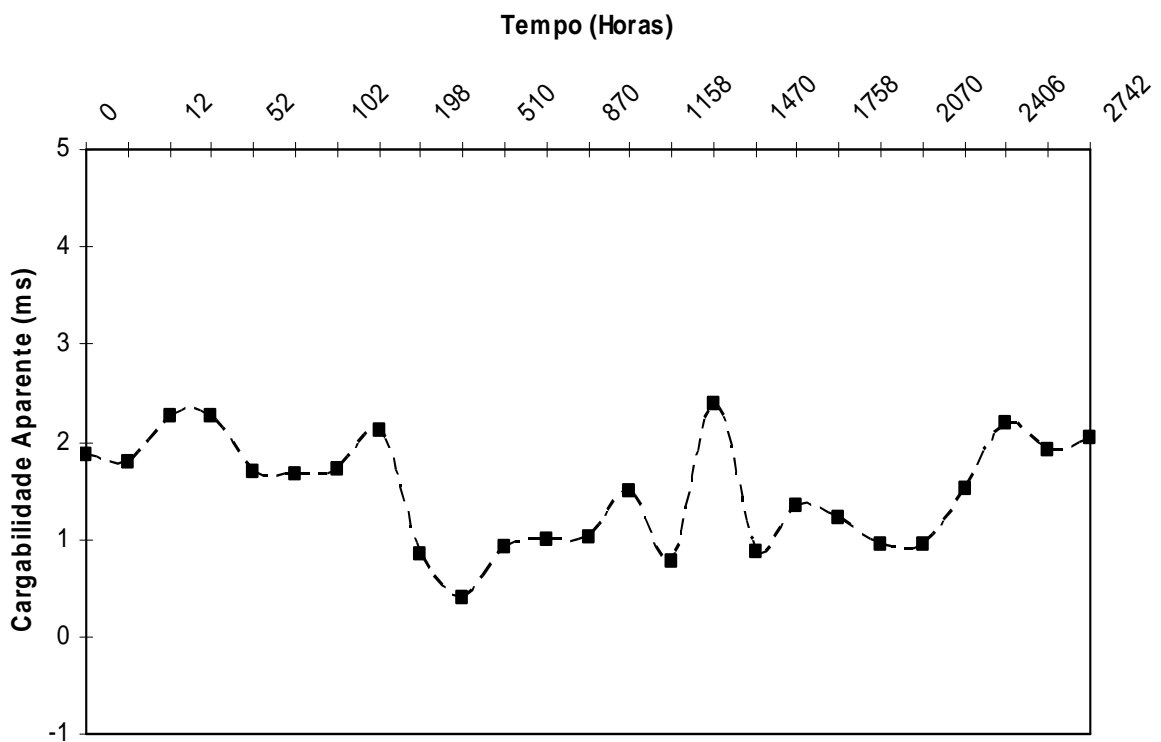


GRÁFICO C7 – Dispersão de cargabilidade no nível Ns-01 (13,1 cm)

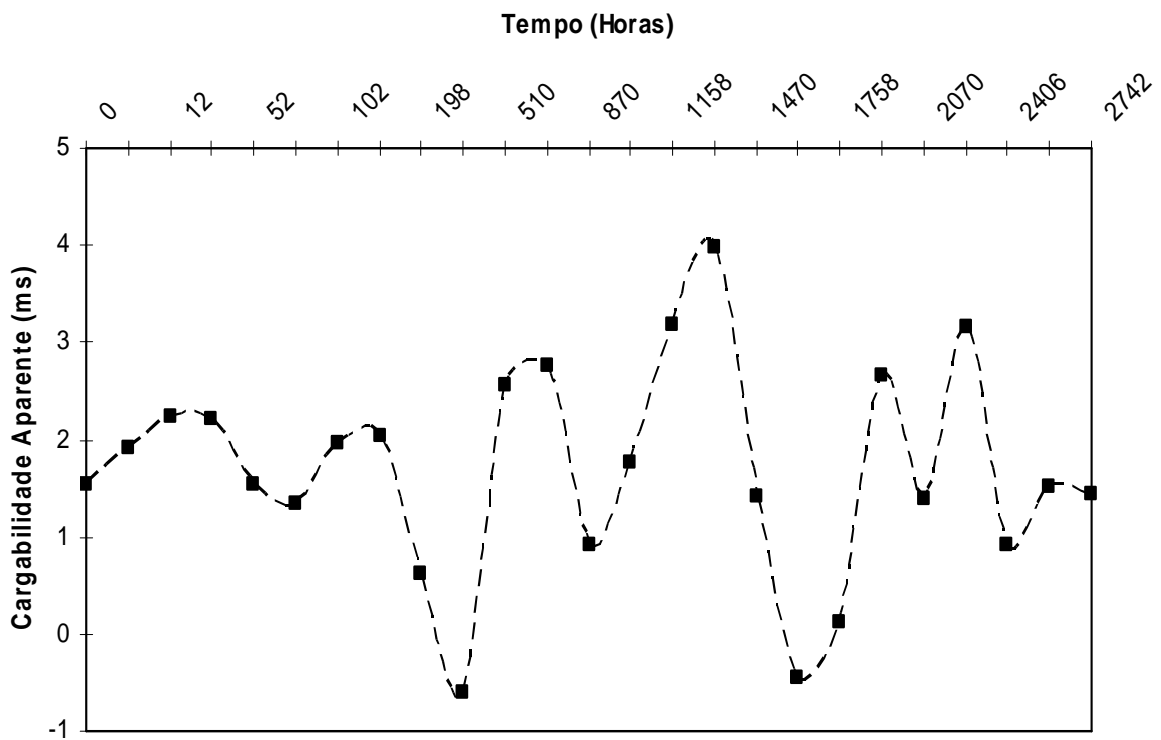


GRÁFICO C8 – Dispersão de cargabilidade no nível Ns-02 (19,0 cm)

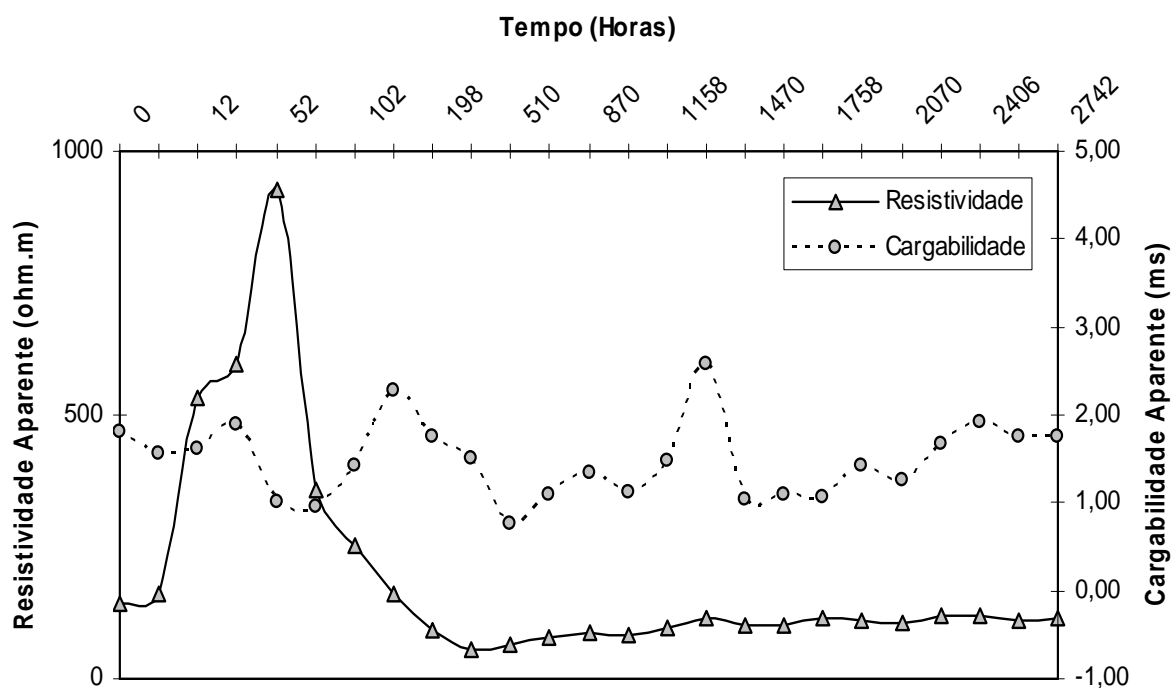


GRÁFICO C9 – Curvas de dispersão integradas no nível Ni-01 (2,6 cm)

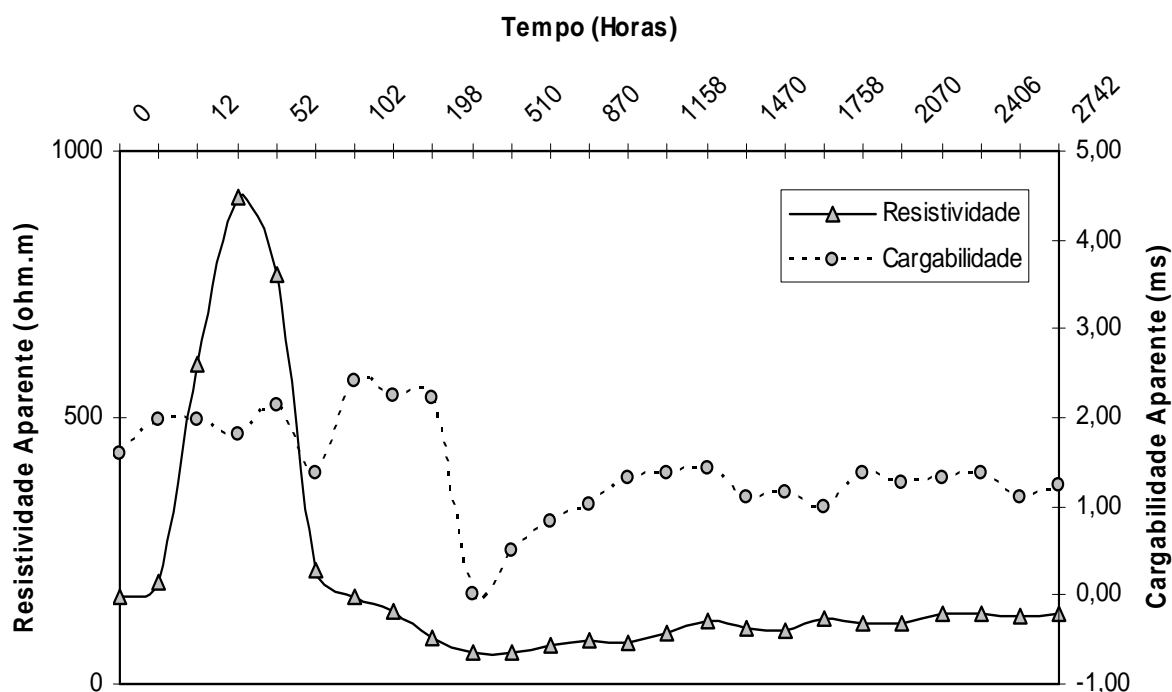


GRÁFICO C10 – Curvas de dispersão integradas no nível Ni-02 (7,7 cm)

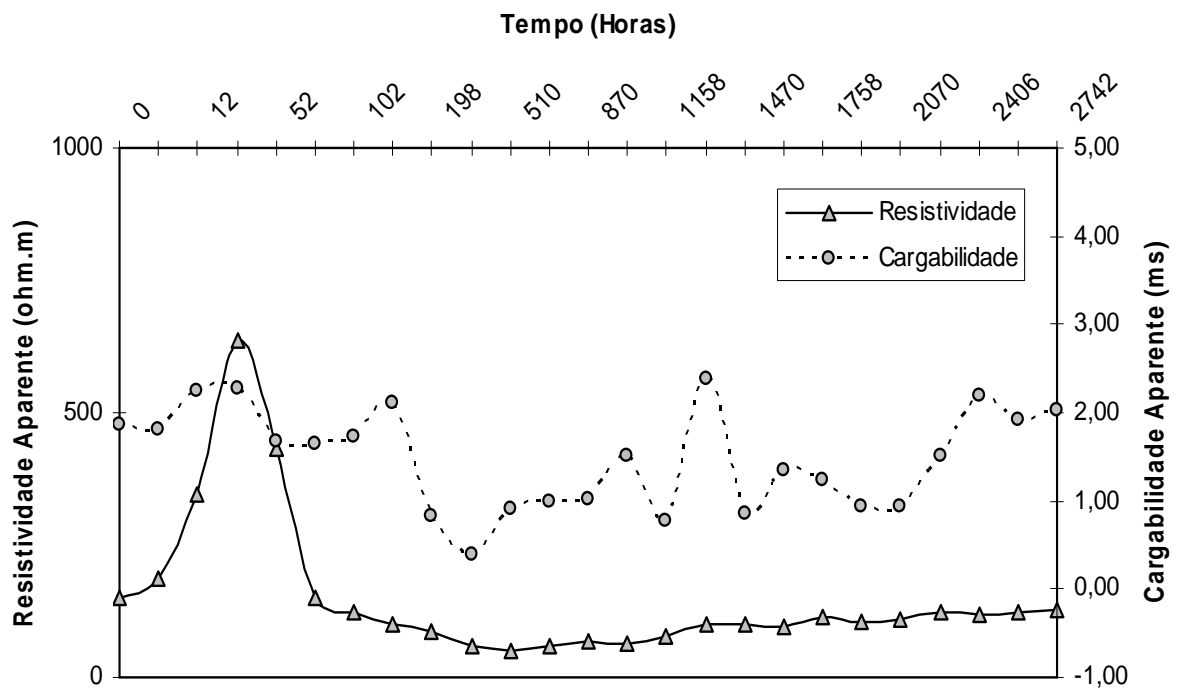


GRÁFICO C11 – Curvas de dispersão integradas no nível Ns-01 (13,1 cm)

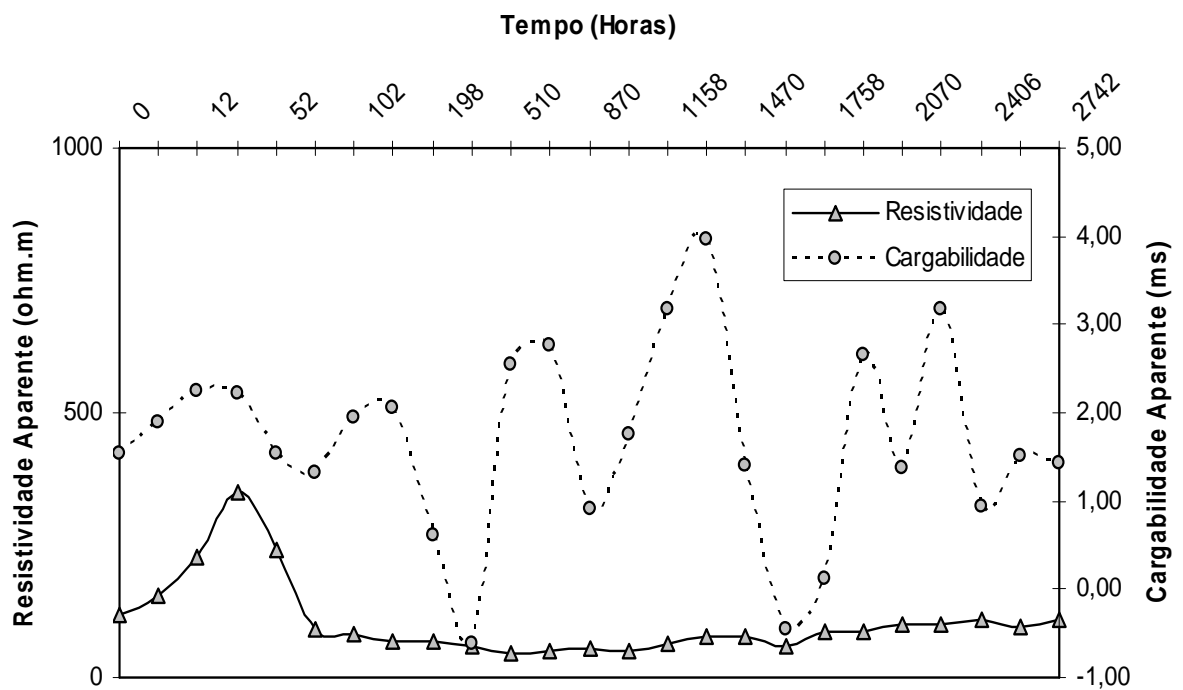


GRÁFICO C12 – Curvas de dispersão integradas no nível Ns-02 (19,0 cm)

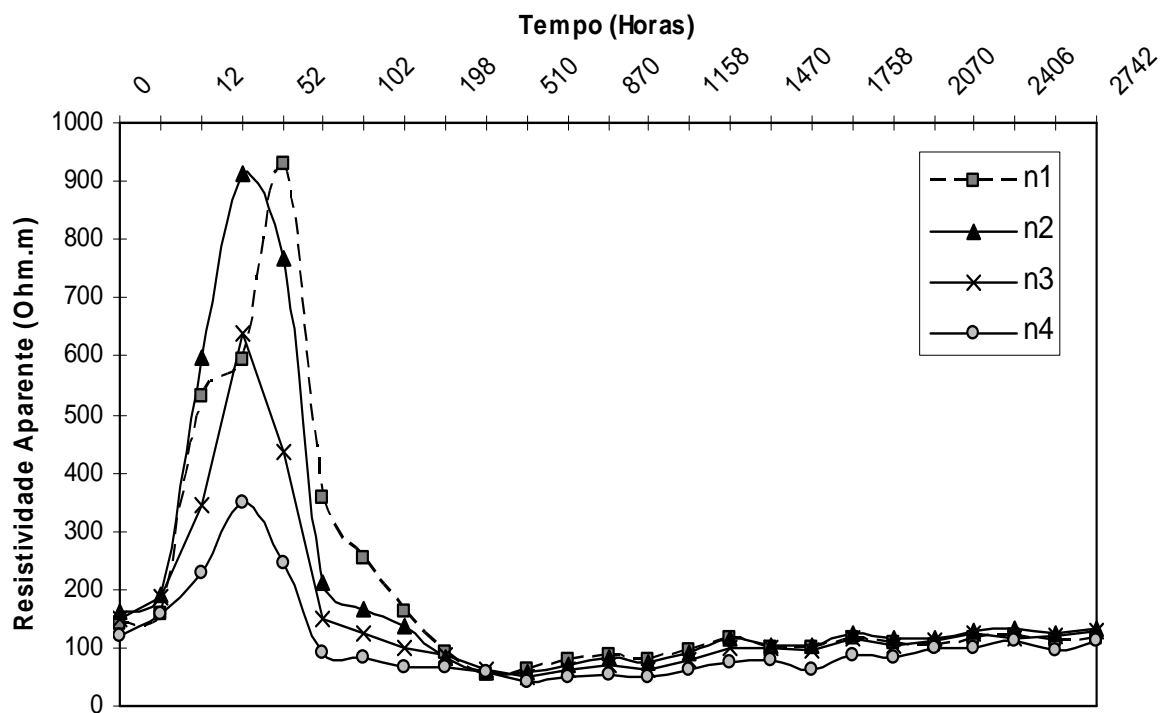


GRÁFICO C13 – Curvas de dispersão de resistividades integradas

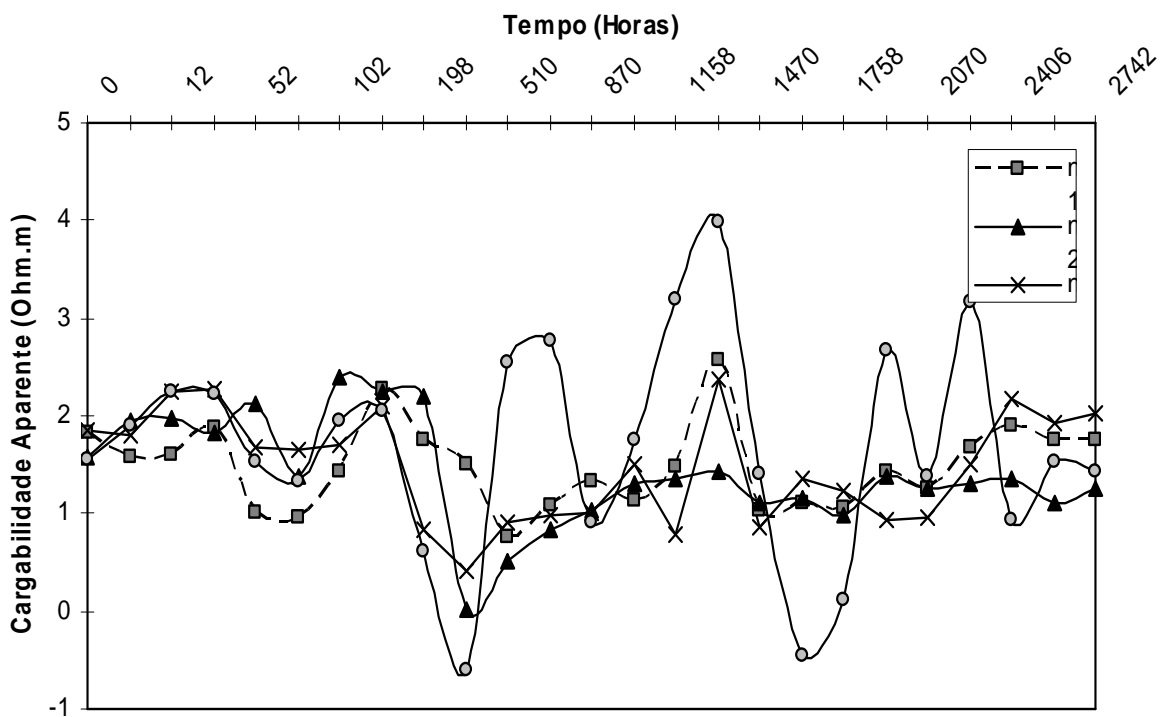


GRÁFICO C14 – Curvas de dispersão de cargabilidades integradas

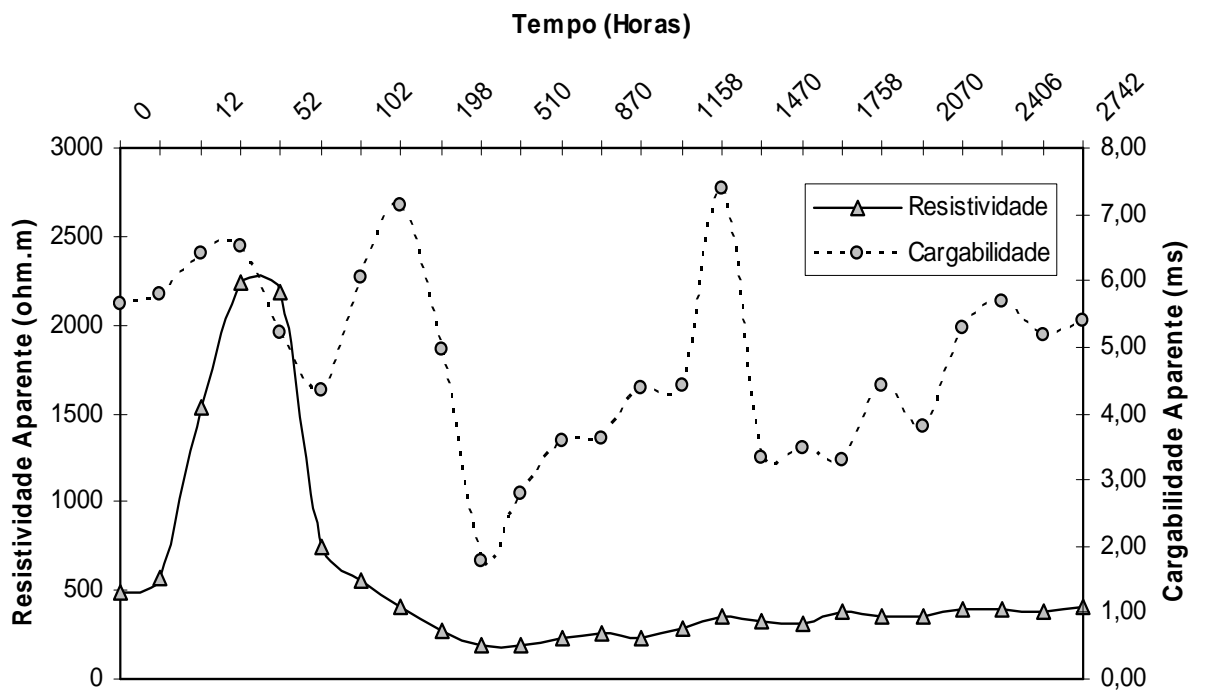


GRÁFICO C15 – Curvas de dispersão média de resistividade e cargabilidade

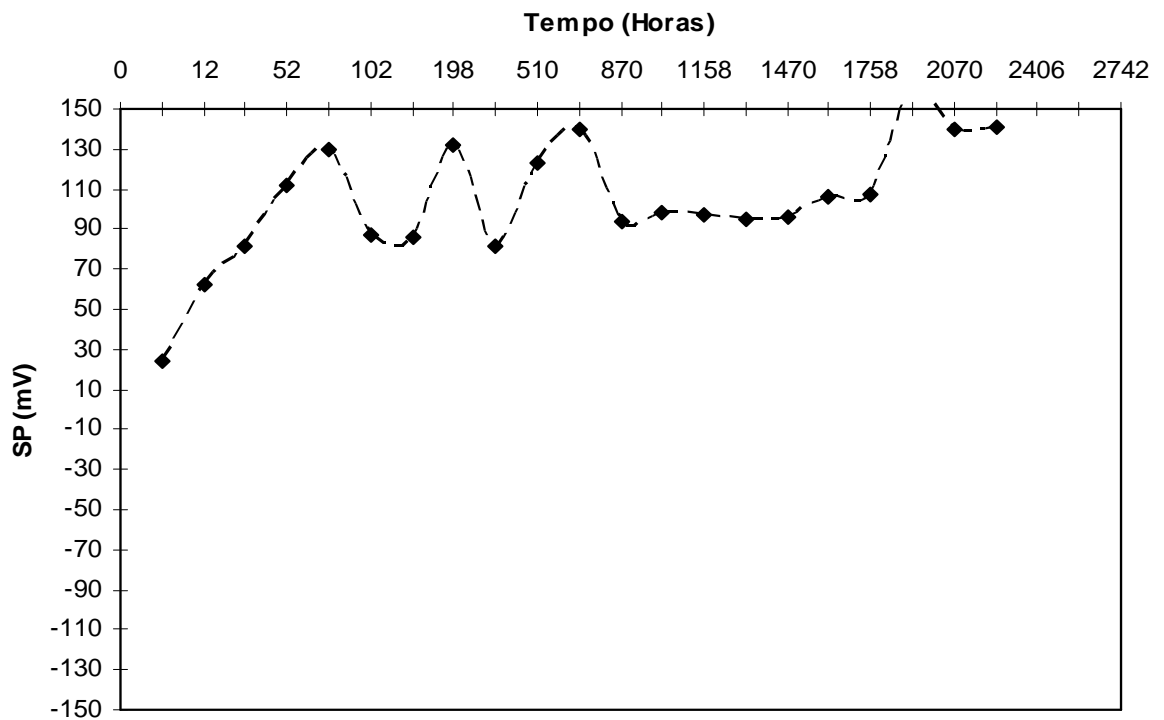


GRÁFICO C16 – Curva de dispersão de SP (2cm)



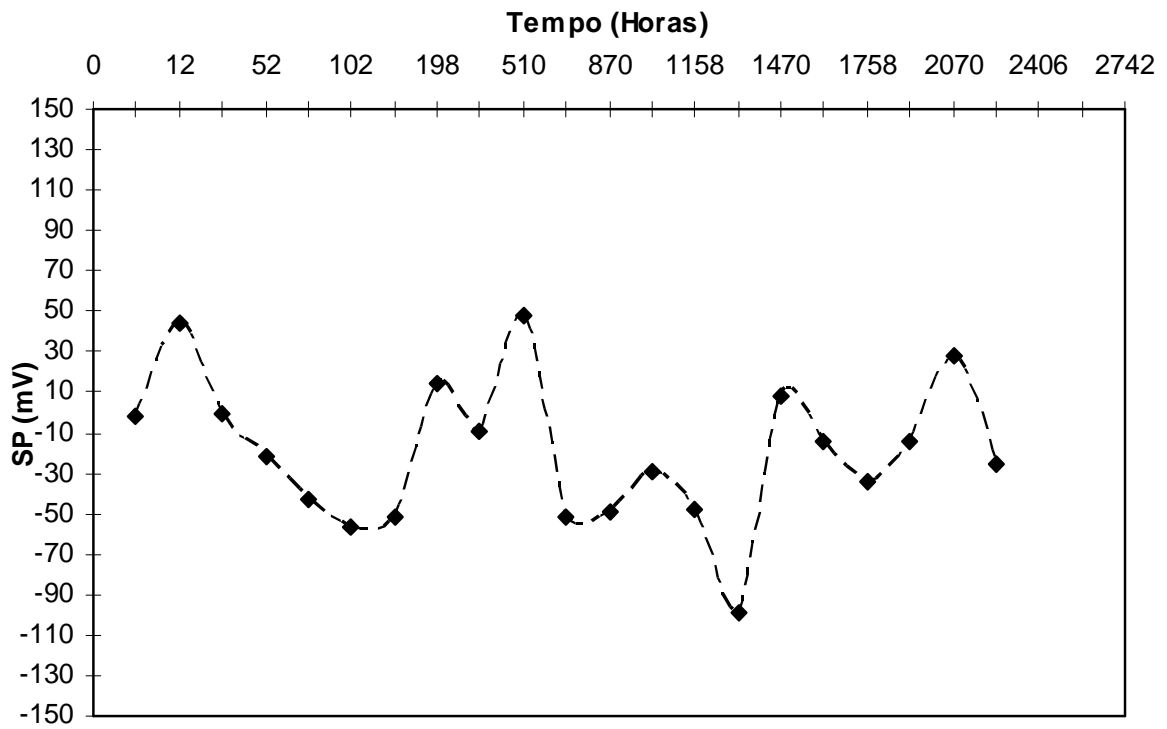


GRÁFICO C17 – Curva de dispersão de SP (6cm)

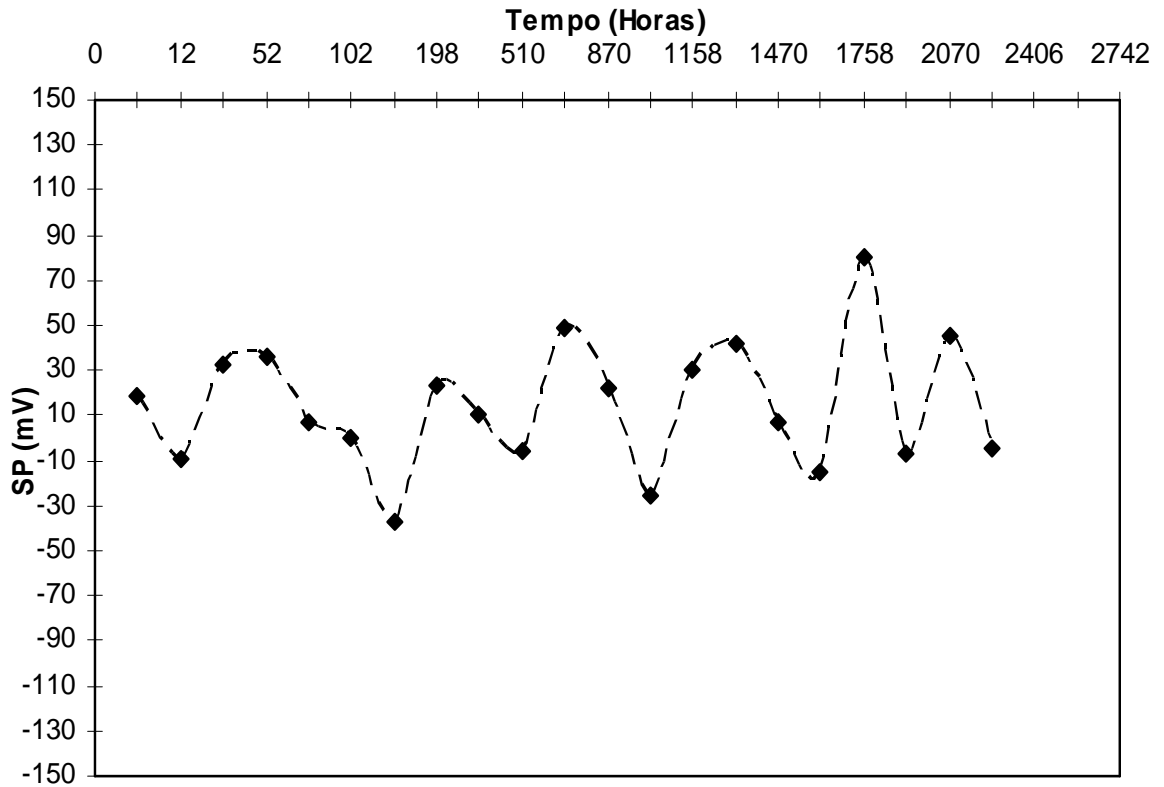


GRÁFICO C18 – Curva de dispersão de SP (12cm)

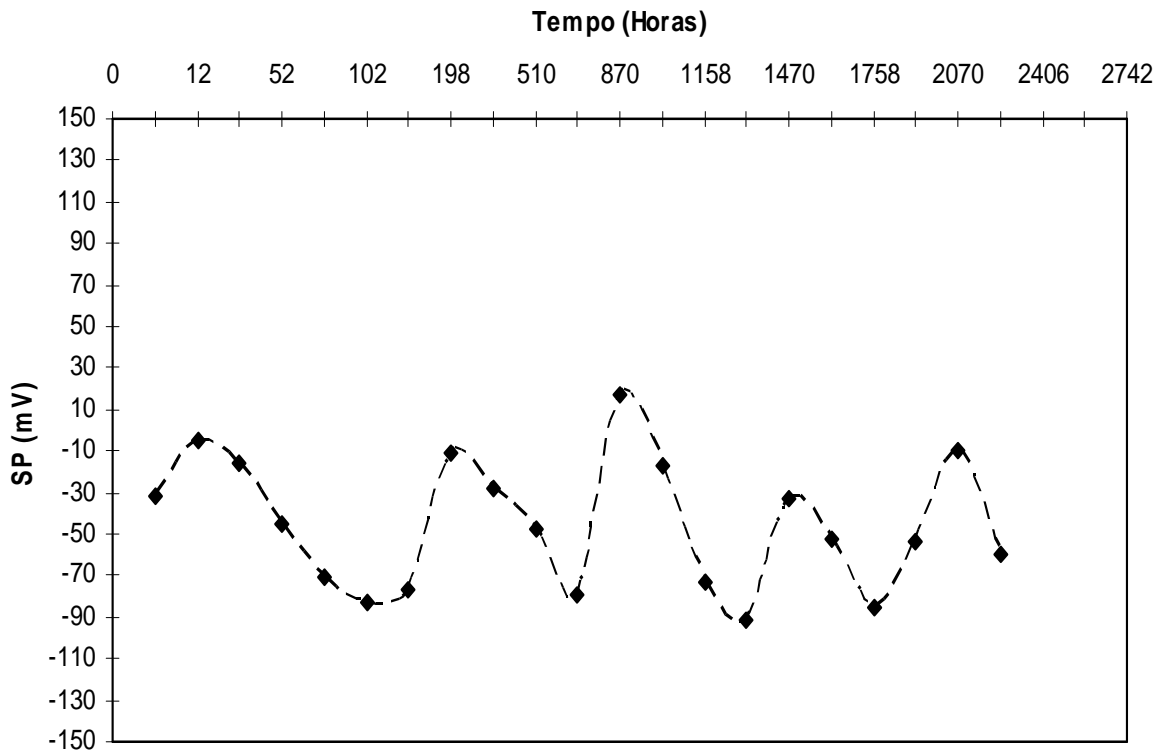


GRÁFICO C19 – Curva de dispersão de SP (16cm)

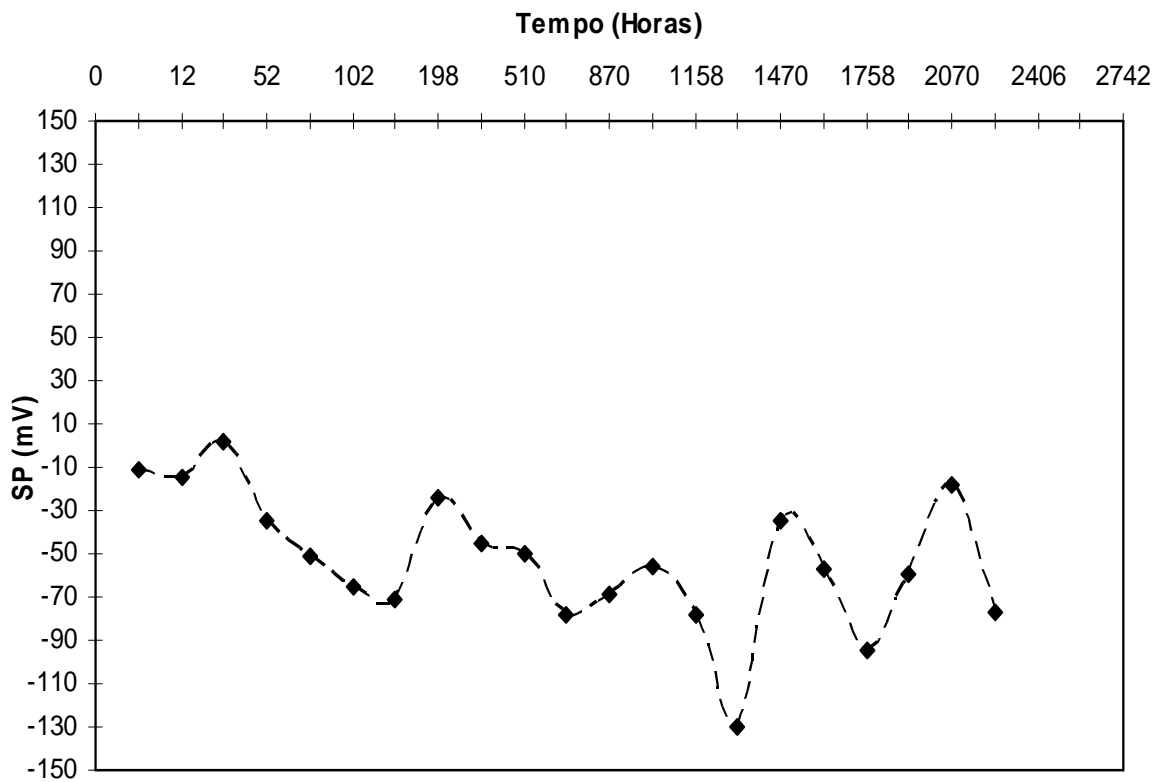


GRÁFICO C20 – Curva de dispersão de SP (18cm)

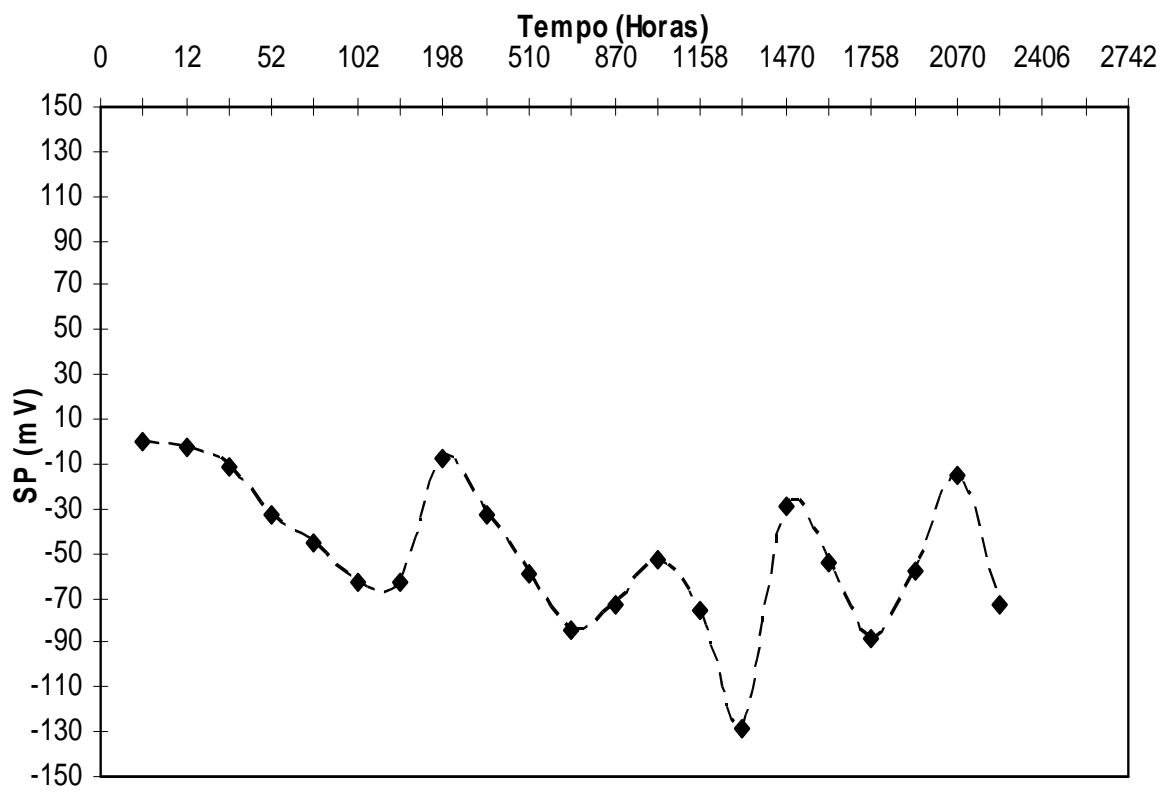


GRÁFICO C21 – Curva de dispersão de SP (26cm)