

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

APLICAÇÃO DO MÉTODO ELETRORRESISTIVO EM
AMBIENTE AQUÁTICO PARA O MAPEAMENTO DO SUBFUNDO
DO RIO SÃO FRANCISCO

Rodrigo Machado

Orientador: Prof. Dr. Fábio Taioli

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

São Paulo

2008

Dedico este trabalho à minha família,
meu filho Vinícius
e a meus colegas de profissão

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Professor Doutor Fábio Taioli, pela paciência, orientação nos caminhos percorridos até aqui e pela amizade sempre oferecida durante todas as etapas.

Especiais agradecimentos ao Eng. Sandro Inácio C. da Cruz e a Geóloga Ângela Cristina B. Rodrigues, representantes da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), pelo apoio nos trabalhos de campo e também no fornecimento de informações adicionais que muito contribuíram para a conclusão deste trabalho. Também a empresa Engevix Engenharia SA, representada pelos Geólogos Paulo Fernando R. Guimarães e Ricardo Vilhena, pela parceria, boa vontade e compartilhamento de conhecimentos de cunho geotécnico/geológico. Meus agradecimentos à empresa Odebrecht Engenharia, representada pela pessoa de José Roberto Brandão. Expresso meus sinceros agradecimentos a estas empresas citadas principalmente pela autorização e disponibilização dos dados geofísicos utilizados neste trabalho.

Ao pessoal da Alta Resolução Geologia e Geofísica, na pessoa do Geofísico Adriano Marchioreto, pela amizade e pelas grandes contribuições técnicas, ao Maurício Vicente, pelo apoio em questões de informática, ao eterno estagiário Thiago Boldo, pelas horas disponibilizadas na checagem dos intermináveis desenhos, a senhorita Flávia Lopes e Elenilton Porfírio pela grande ajuda na organização dos dados e construção dos perfis batimétricos. Este pessoal foi fundamental para a realização e conclusão deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Objetivo.....	02
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO.....	04
2.1. Eletrorresistividade.....	04
2.2. Arranjo Dipolo-Dipolo/Pseudo-seções de Resistividade.....	09
2.2.1 O Arranjo.....	09
2.2.2 Pseudo-seções.....	10
2.3. Inversão de dados eletrorresistivos.....	12
2.4. Imageamento Geométrico.....	14
2.5. Eletrorresistividade em Ambientes Aquáticos.....	15
2.6. Batimetria.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DOS ESTUDOS.....	22
5. ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	24
5.1. Generalidades.....	24
5.2. Aspectos Estruturais.....	26
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
6.1 Equipamentos e acessórios utilizados.....	28
6.2 Métodos.....	30
6.3 Dificuldades de Implementação e Soluções Adotadas.....	31
7. TRABALHOS REALIZADOS.....	34
8. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	36

9. CONSIDERAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS.....	38
9.1. Sobre as dificuldades do levantamento com alta densidade de dados.....	38
9.2. Integração das Informações.....	39
10. CONCLUSÕES.....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

ANEXOS

ANEXO 1

DESENHO 1 – Planta de Localização dos Eixos do AHE Riacho Seco

DESENHO 2 – Planta de Detalhe dos Eixos 1, 2 e 3 do AHE Riacho Seco

DESENHO 3 – Planta de Detalhe dos Eixos 4 e 5 do AHE Riacho Seco

ANEXO 2

DESENHO 4 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 1 - EnMd

DESENHO 5 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 2 - ExBd

DESENHO 6 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 3 - EnJd

DESENHO 7 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 4 - EnMe

DESENHO 8 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 5 - EnJe

DESENHO 9/A – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LA, LB, LC

DESENHO 9/B – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LD, LE

DESENHO 9/C – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LF, LG, LH

DESENHO 10 – Seções Transversais ao Eixo3 – Seções L3A, L3B, L3C e L3D

DESENHO 11 – Seções Transversais aos Eixos 4 e 5 – Seções L4/5A, L4/5B, L4/5C e L4/5D

ANEXO 3

DESENHO 12 – Planta Síntese das Informações Geofísicas – Eixos 1, 2 e 3

DESENHO 13 – Planta Síntese das Informações Geofísicas – Eixos 4 e 5

ANEXO 4

SEÇÕES BATIMÉTRICAS

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1-1 – Princípio do método da eletrorresistividade. Os eletrodos externos injetam corrente (eletrodos de corrente) enquanto os eletrodos centrais (eletrodos de potencial) efetuam a leitura da diferença de potencial estabelecida entre eles. (<i>Modificado de Braga, 1997</i>).....	05
FIGURA 2.1-2 – Principais arranjos de campo utilizados em levantamentos eletrorresistivos (a) Schlumberger, (b) Wenner e (c) Dipolo-Dipolo (Gallas, 2000).....	08
FIGURA 2.2-1 . Arranjo dipolo-dipolo, posição dos pontos amostrados e síntese dos fenômenos físicos que ocorrem em subsuperfície devido à injeção de corrente elétrica na superfície. (Gallas, 2000).....	10
FIGURA 2.2.2-1 – Exemplo de uma pseudo-seção obtida com a execução de Caminhamento Elétrico onde (+) indicam as posições aparentes dos pontos de leituras. Cada ponto representa um valor da resistividade elétrica aparente, obtida através da equação (11). (Modificado de Res2Dinv, Geotomo Software - 2004).....	11
FIGURA 2.2.2-2 – Exemplo de apresentação de uma pseudo-seção com os valores das resistividades elétricas aparentes associados a uma escala de cores (Modificado de Res2Dinv, Geotomo Software - 2004).....	11
FIGURA 2.3-1 - Pontos amostrados (leitura das resistividades elétricas - pseudo-seção) em subsuperfície com uso de equipamento multieletrodo. Possibilidades de aquisições de grande quantidade de leituras (elevada densidade de pontos). (Modificado de Res2Dinv, Geotomo Software - 2004).....	13
FIGURA 2.3-2 . Discretização do subespaço - Modelo de Blocos da Subsuperfície. (Modificado de Res2Dinv, Geotomo Software - 2004).....	13
FIGURA 2.3-3 -. Exemplo de Seção Sintética Modelada simulando a identificação de uma melhor imagem da subsuperfície (refinamento) evidenciando a ocorrência de uma falha e tubulação, após inversão dos dados (Modificado de Res2Dinv, Geotomo Software - 2004).....	14
FIGURA 2.4-1 - Simulação para aquisição de leituras das resistividades elétrica com alta densidade de pontos. Estimativa da profundidade real a ser investigada e posição dos pontos de leituras. A grande quantidade de leituras eleva o levantamento para o <i>Imageamento Geométrico</i> . (Adaptado de Iris Instruments Software, 2006).....	15
FIGURA 2.5-1 – Ilustração de duas seções de Imageamento Geométrico obtidas utilizando o equipamento Syscal Pro integrado a GPS e eco-batímetro. Cabo multieletrodo arrastado na superfície da água. (Adaptado de Iris Instrument, 2006).....	17
FIGURA 2.6-1 – Seção batimétrica típica após processamento, obtida por eco-batímetro de duplo feixe com elevada densidade de pontos (Levantamento realizado nas águas do rio São Francisco com varredura a cada 2m navegados na superfície do rio).....	19
FIGURA 4-1 - Localização do estado da Bahia e detalhe da localidade de Riacho Seco, às margens do rio São Francisco.....	22
FIGURA 4-2 - Planta de detalhe dos locais de trabalho com localização dos cinco eixos previstos do AHE Riacho Seco e o povoado de mesmo nome às margens do rio São Francisco no estado da Bahia.....	23
FIGURA 5.1-1 - Mapa Geológico da região dos estudos (Carta Geológica do Brasil, escala	

1:1.000.000, 2004).....	25
FIGURA 5.1-2 – Seqüência estratigráfica simplificada da Carta Geológica do Brasil, escala 1:1.000.000, 2004.	26
FIGURA 6.1-1 – Esquema de interconexão do sistema integrado (Adaptado de Iris Instruments, 2006).....	28
FIGURA 6.1-2 - Detalhe da total integração do sistema utilizado para as aquisições dos dados de GPS/Batimetria (A), dos valores das resistividades elétricas através do equipamento Syscal Pro (B), adaptação do transdutor do batímetro e sua fixação na lateral da embarcação, logo abaixo da linha da água (C) e (D).....	29
FIGURA 6.1-3 - Vista parcial do cabo multieletrodo sendo colocado na água (a); e detalhe de um dos <i>takeouts</i> de grafite e bóia acoplada para garantir a flutuabilidade do cabo (b).....	30
FIGURA 6.3-1 - Detalhe do transdutor do eco-batímetro adaptado na lateral da embarcação em navegação com velocidade acima de 5 km/h. Turbulência junto ao sensor favorecendo ocorrências de ruídos nas leituras da batimetria.....	31
FIGURA 6.3-2 – Testes de ruído nos dados batimétricos: (a) Aquisição em velocidades acima de 5 km/h ocasionando forte incidência de ruídos. Em (b) a velocidade de navegação foi de 3 km/h ocorrendo redução significativa do nível de ruído nos dados coletados.....	32
FIGURA 6.3-3 – Trajetória navegada nas três travessias ortogonais ao fluxo do rio. Ocorrências de derivas do cabo multieletrodo.....	32
FIGURA 6.3-4 – (a) Local de travessia do eixo previsto e a deriva do cabo multieletrodo na correnteza do rio. (b) Solução para a deriva com execução de seções paralelas às margens do rio e navegação contra a correnteza.....	33
FIGURA 9.2-1 - Escala cromática das resistividades elétricas utilizadas nas seções de imageamento (valores em Ohm.m).....	39
FIGURA 9.2-2 – Exemplo de seção de imageamento geoeletrico obtida nos levantamentos de campo.....	40
FIGURA 9.2-3 - Legenda apresentada nos desenhos das Seções de Imageamento Geoeletrico com indicação das anomalias geofísicas demarcadas nas seções e as interpretações inferidas.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-1 - Valores típicos de resistividades elétricas para litologias conhecidas (Adaptado de Orellana, 1972).....	04
Tabela 7-1 – Coordenadas de Locação dos Eixos previstos do AHE Riacho Seco.....	34
Tabela 7-2 - Seções de Imageamento Geométrico executadas nos estudos do AHE Riacho Seco – PE/BA.....	35

RESUMO

A técnica geofísica da eletrorresistividade adaptada para ambientes aquáticos, com a tecnologia que hoje temos à disposição, mostra-se bastante promissora e de grande produtividade tanto na coleta dos dados de campo como no reconhecimento de feições de interesse do substrato, possibilitando ainda a liberdade de se adquirir tais informações em perfis subaquáticos contínuos em quaisquer trechos navegáveis de rios e lagos e, eventualmente de mares.

Neste contexto, esta dissertação abordou a aplicabilidade desta técnica, com a utilização de modernos equipamentos e acessórios adaptados para trabalhos em lâmina d'água, onde foram executados e estudados os procedimentos de campo, processamentos e integração dos dados coletados, além da verificação da consistência dos resultados obtidos através da realização de linhas de estudos paralelas e também ortogonais.

Os testes de aplicação da técnica foram realizados nas águas do rio São Francisco, mais precisamente em seu trecho que faz divisa dos estados da Bahia e Pernambuco, região nordeste do Brasil, local este que também tem sido objeto de estudos para o Projeto do Aproveitamento Hidrelétrico Riacho Seco, pertencentes à empresa Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), responsável por diversos estudos e desenvolvimentos desta região, notadamente dos recursos hídricos do baixo São Francisco.

Os trabalhos de campo lançaram mão do uso de embarcação para transportar e arrastar, na superfície da água, um cabo multi-eletrodo de imageamento geoeletrico, especialmente desenvolvido para tais fins, bem como todos os equipamentos integrados a saber: equipamento GPS de navegação em ambientes aquáticos, eco-batímetro de dupla frequência adaptado na embarcação, eletrorresistivímetro multicanal e *notebook* com *software* específico para o gerenciamento de todas as operações e dados.

Os resultados mostraram que foi possível mapear a fisiografia do leito do rio bem como identificar e delimitar anomalias geofísicas compatíveis a prováveis ocorrências de depósitos de sedimentos assim como feições típicas de contatos litológicos e mesmo de estruturas do tipo alteração/fraturamento no interior dos materiais do subfundo do rio.

ABSTRACT

The electric tomography geophysical technique adapted for aquatic environment, with the modern technology available nowadays, reveals itself sufficiently promising and of great productivity both in the field data collection and in the recognition of aspects of interest of the substratum. It is possible to make the data acquiring in any navigable stretches of rivers, lakes and some seas.

In this context, this paper approached the applicability of this technique, with the use of modern equipment and accessories for works in the water. The field procedures, the data processing and integration of the data collection are discussed considering the acquisition of a great amount of data both parallel and orthogonal to the river.

The application tests of the technique were conducted in the river San Francisco, in the region of the border of the states of Bahia and Pernambuco, northeast region of Brazil. This area was selected because it has been subject of studies to install a hydroelectric plant (Riacho Seco), owned by the Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF).

To perform the field works a boat was used to carry and drag, in the surface of the water, a multi-electrode cable of electric tomography, especially developed for such purposes, as well as all the integrated equipment namely: GPS especially designed for navigation in aquatic environments, adapted fathometer of double frequency in the boat, multichannel eletrorresistivímeter and notebook with specific software that managed all the operations and data.

The results had shown that it was possible to map the fisiography of the riverbed as well as identifying and delimiting geophysical anomalies compatible to the probable occurrences of deposits of sediments as well as typical lithologic contacts and structures like weathering and fractures in the underground materials in the bottom of the river.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos geofísicos terrestres vêm sendo cada vez mais aplicados como importantes aliados à investigação geológica e para avaliação da subsuperfície em estudos geotécnicos, hidrogeológicos e ambientais. Isto se deve à rapidez na coleta de dados em campo e ao relativo baixo custo quando comparado às demais técnicas de investigações disponíveis, além de fornecer uma grande densidade de informações. Por outro lado, análises diretas, mapeamentos de campo, sondagens mecânicas, obtenção de amostras de solos/rochas, entre outros, sempre farão parte do elenco de estudos em projetos de engenharia, mineração, hidrogeologia, meio ambiente e demais áreas.

Independente do tipo de projeto que será executado, o tempo para a obtenção dos resultados de estudos preliminares, e conseqüentemente a tomada de decisões, é sempre exíguo. Desta forma, a geofísica se torna uma excelente opção para otimizar o tempo e a complementação de tais estudos. A justificativa é que, com o uso de uma ou mais técnicas geofísicas, torna-se possível delimitar áreas potencialmente prioritárias para o(s) objetivo(s) dos projetos e também para embasar as decisões necessárias para as subseqüentes pesquisas.

As mesmas necessidades de estudos acometem também ambientes aquáticos, a exemplo dos casos de prospecção petrolífera em áreas costeiras, instalações de dutos submarinos, dragagens de canais para navegação e manobras necessários para instalação de zonas portuárias, construções de barragens e reservatórios para geração de energia ou abastecimento, etc.

A preocupação a respeito das questões de assoreamentos de rios, lagos e reservatórios são sempre levados ao conhecimento da população, notadamente em projetos de transposições e barragens.

Estes temas já vêm sendo objetos para estudos e publicações no meio técnico e acadêmico, produzindo grande conhecimento para a comunidade através de publicações técnicas e teses, nacionais e internacionais (Griffiths & Barker, 1993; Souza, 2006; Yang, Jean & Chen, 2007).

A razão principal para este desenvolvimento das técnicas geofísicas adaptadas para ambientes aquáticos é, com certeza, o grande desenvolvimento tecnológico das últimas duas décadas, notadamente dos recursos computacionais (computadores mais eficientes e softwares específicos) sistemas de posicionamento global mais precisos (GPS e DGPS) e equipamentos geofísicos mais eficientes (surgimento de novas

tecnologias eletrônicas, redução de dimensão, autonomia das baterias portáteis, etc.) que, associados, possibilitam aquisições e processamentos de grandes quantidades de dados geofísicos em curtos espaços de tempo e a custos praticáveis.

Com este contexto, o *Método Geofísico da Eletroresistividade*, método convencional amplamente utilizado em ambientes emersos, vem crescentemente se consagrando como ferramenta essencial para estudos em ambientes com lâminas d'água, estudos estes que, tradicionalmente, eram efetuados utilizando-se somente a propagação de ondas acústicas.

O imageamento geométrico do subfundo do rio foi executado com o arranjo dipolo-dipolo e cabo aquático multieletrodo para 13 eletrodos equiespaçados de 5 metros, o que permitiu a aquisição em dez níveis distintos de profundidades, com leituras simultâneas dos dez canais, configuração esta que permitiu varredura até cerca de 15 metros de profundidade abaixo do leito do rio. As aquisições foram programadas para serem executadas a cada dois metros o que tornou o levantamento de cada seção bastante adensado.

Após a etapa de aquisição dos dados em campo, estes foram processados, integrados e organizados para a aplicação dos processos de inversão 2D (Loke, 1996). Os produtos finais foram os perfis subaquáticos que mostraram a fisiografia da superfície do leito do rio (batimetria) e o imageamento geométrico do subfundo. Estas imagens apresentaram as variações das resistividades elétricas dos materiais da subsuperfície e tornaram evidentes anomalias geofísicas compatíveis às prováveis ocorrências de camadas de sedimentos sobrepostos ao material rochoso local (predomínio de rochas granito-gnáissicas), bem como contrastes laterais do parâmetro medido, um forte indício de contatos litológicos. Também foram identificadas anomalias características de estruturas de alteração e fraturamento.

Como subproduto da técnica geofísica, também foram obtidos concomitantes ao imageamento geométrico, as batimetrias dos trechos investigados. Elas foram realizadas através da técnica do eco-batímetro e serviu de base para a construção das seções de imageamento geométrico com a indicação das espessuras da lâmina d'água e, conseqüentemente, o relevo topográfico do fundo do rio.

1.1 Objetivos

O presente estudo objetivou verificar a capacidade, aliada à praticidade, do método geofísico por eletroresistividade, adaptado para áreas subaquáticas, para fornecer

informações sobre variações litológicas no subfundo do rio. Além disso, procurou-se verificar também a capacidade de mapear possíveis anomalias geofísicas que possam estar associadas a ocorrências de contatos geológicos e zonas estruturadas no interior do maciço local, como alterações e/ou falhamentos, locais estes que podem apresentar condições desfavoráveis a projetos de barragens e outras obras de engenharia.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO

2.1 Eletrorresistividade

Os diferentes materiais que compõem a superfície e subsuperfície da Terra (solos e rochas) apresentam características físicas distintas e já bastante estudadas (Orellana, 1972; Dobrin, 1981; Telford et. al, 1990). Dentre elas ressalta-se a capacidade que os materiais apresentam de conduzir corrente elétrica, *condutividade elétrica*, ou seu inverso, *resistividade elétrica*. Diferentes solos e rochas apresentam valores contrastantes nos valores das resistividades e, apesar da grande variabilidade desta capacidade, os diferentes materiais podem ser identificados por esta propriedade que fundamenta o método eletrorresistivo. A Tabela 2.1-1 apresenta alguns valores típicos desta propriedade física para algumas litologias comumente encontradas na natureza.

Tabela 2.1-1 - Valores típicos de resistividades elétricas para litologias conhecidas (Adaptado de Orellana, 1972).

LITOLOGIA	RESISTIVIDADE (Ohm.m)
Águas doces superficiais	10 a 1.000
Águas marinhas	0,2
Argilas	10 a 100
Areias	100 a 10.000
Areias Saturadas com água mineral	1 a 10
Aluvião	10 a 1.000
Conglomerados	10 a 10.000
Arenitos	10 a 10 ⁸
Margas arenosas	10 a 100
Calcários	100 a 10.000
Basaltos	100 a 100.000
Granitos	100 a 100.000
Xistos	10 a 1.000
Gnaisses	100 a 10.000

O principal mecanismo de condução elétrica pelos materiais da subsuperfície é, sem dúvida, a *condução iônica*, ou *eletrolítica*. Neste mecanismo, o fluxo da corrente ocorre através de íons presentes nos fluidos intersticiais nos poros dos solos e rochas. Em alguns casos, a *condução eletrônica* também ocorre em materiais que apresentam elétrons livres, como é o caso de materiais metálicos e sulfetos metálicos. A física

envolvida nos processos de condução elétrica entre os materiais da subsuperfície, de forma mais detalhada, pode ser encontrada em Orellana (1972) e Telford *et al.*(1990).

Desta forma, o método eletrorresistivo baseia-se na passagem pelo solo de uma corrente elétrica contínua de intensidade I , transmitida por um par de eletrodos denominados **A** e **B** (eletrodos de corrente), ligado a um emissor **E** (baterias ou grupo gerador). Mede-se a diferença de potencial ΔV entre outros dois eletrodos denominados **M** e **N** (eletrodos de potencial), conforme ilustra a FIGURA 2.1-1

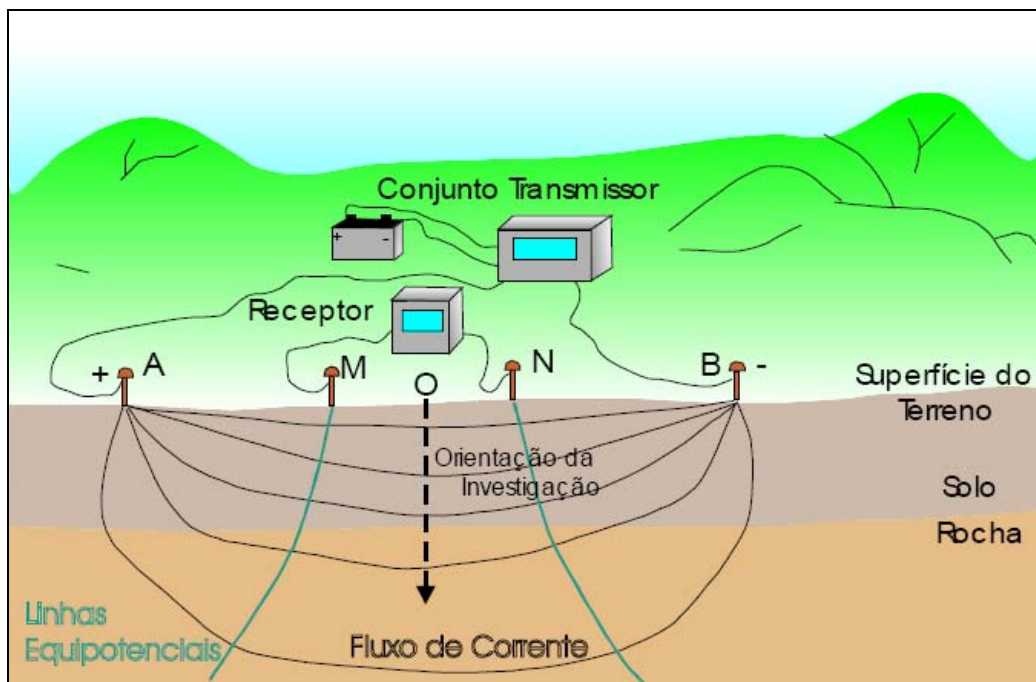


FIGURA 2.1-1 – Princípio do método da eletrorresistividade. Os eletrodos externos injetam corrente (eletrodos de corrente) enquanto os eletrodos centrais (eletrodos de potencial) efetuam a leitura da diferença de potencial estabelecida entre eles. (Modificado de Braga, 1997)

Ao induzirmos a circulação de corrente elétrica na Terra, através dos dois eletrodos de corrente, como resposta estabelece-se um campo elétrico vetorial (\vec{e}) que, para correntes contínuas será conservativo podendo ser escrito por:

$$\vec{e} = -\vec{\nabla}V \quad (1)$$

onde V é a função escalar potencial elétrico, dependente da posição, e $\vec{\nabla}$ o operador gradiente.

Em resposta a este campo elétrico, estabelece-se uma densidade de corrente (\vec{J}) que, pela lei de Ohm é dada por:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{e} \quad (2)$$

ou

$$\vec{J} = -\sigma \cdot \vec{\nabla}V \quad (3)$$

onde σ representa a condutividade elétrica do meio.

No pólo positivo do eletrodo de corrente as cargas adquirem um movimento divergente, e no pólo negativo, adquirem movimento convergente. Desta forma, a equação (3) pode ser escrita como abaixo:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \vec{\nabla} \cdot (-\sigma \cdot \vec{\nabla}V) \quad (4)$$

que para domínios com condutividade constante, temos:

$$\vec{\nabla}^2 V = -\rho \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{J} \quad (5)$$

e para regiões fora das fontes

$$\vec{\nabla}^2 V = 0 \quad (6)$$

que são respectivamente as equações de Poisson e Laplace.

Resolver problemas de eletrorresistividade significa resolver tais equações com as seguintes condições de fronteira na interface entre estratos com resistividades elétricas distintas:

continuidade do potencial elétrico;

continuidade da componente normal da densidade de corrente

continuidade da componente tangencial do campo elétrico

o potencial elétrico se anula no infinito (decaimento com a distância)

Apesar de ser possível mensurar o fluxo de corrente elétrica injetada ao solo, bem como o potencial que se estabelece em resposta na superfície do terreno, não é possível saber qual o exato caminho do fluxo da corrente.

O desenvolvimento do método, aceita pela comunidade científica, tem origem na década de 1920, a partir dos trabalhos realizados pelos irmãos Schlumberger que

observaram possíveis diagramações entre os eletrodos de corrente e potencial, assim como as profundidades de estudos atingidas. (Edwards, 1977; Orellana, 1972)

Levantamentos eletrorresistivos fornecem as feições da distribuição da resistividade elétrica em subsuperfície. Para converter esta informação de resistividade em informação geológica, algum conhecimento da geologia da área e de valores de resistividade elétrica típicos de alguns materiais é importante.

A *resistividade aparente* (ρ_a) é o parâmetro físico fornecido pelo método da eletrorresistividade, uma vez que não se estima o valor exato de uma camada homogênea e isotrópica, mas sim o efeito total de todas as unidades próximas aos eletrodos de corrente e potencial. Ela é calculada através da equação (7) utilizando os valores obtidos das leituras da corrente elétrica injetada no solo e do potencial elétrico medido, conforme a FIGURA 1.

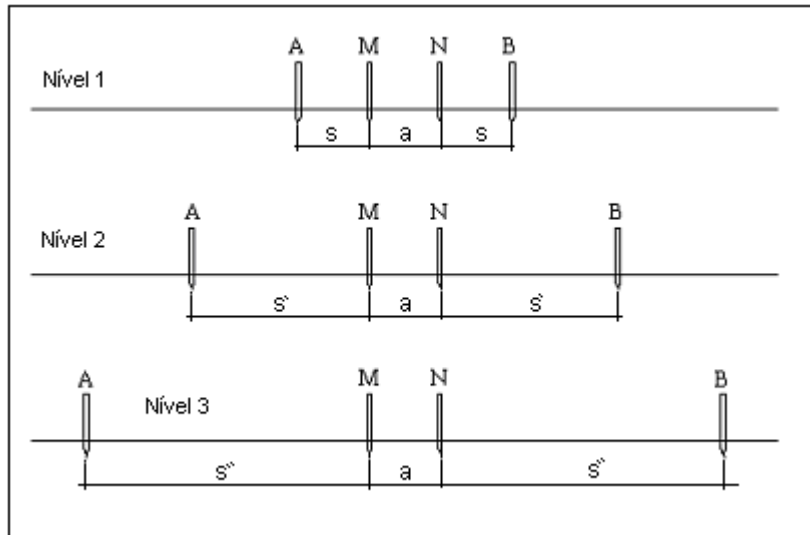
$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (7)$$

onde K representa o fator geométrico que depende da geometria entre os eletrodos, ou seja, do tipo de *arranjo de eletrodos*. Em geral, para quadripolos como apresentado na FIGURA 2.1-1 temos:

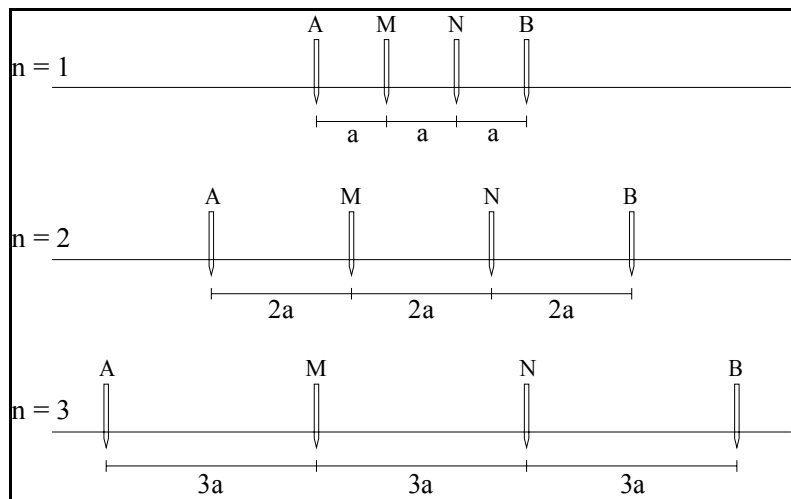
$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (8)$$

São dois os empregos mais usuais de medidas das resistividades elétricas aparentes para investigarmos a subsuperfície: informação pontual, com valores tomados na vertical (Sondagens Elétricas Verticais - SEV) e na horizontal (Caminhamento Elétrico ou Imageamento Elétrico) com medidas obtidas na vertical e também lateralmente. Nas SEV a separação entre os eletrodos para cada leitura de resistividades aparentes é tomada gradualmente crescente, mantendo-os simétricos em relação ao ponto central fixo do arranjo (centro da SEV). Obtêm-se assim dados em diferentes níveis de profundidades num plano que passa pelo centro do arranjo (Levantamento 1D).

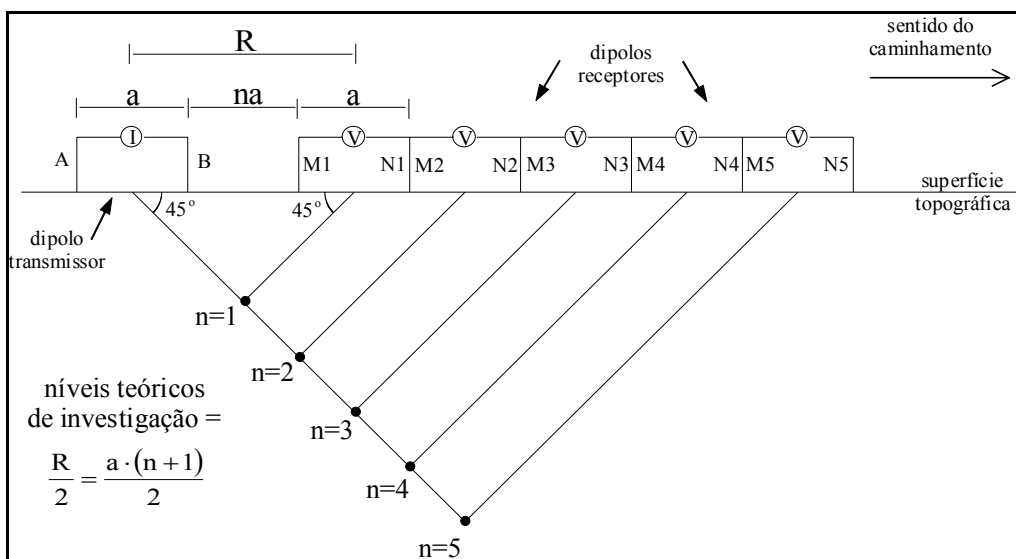
Dentre todos os arranjos conhecidos, os mais utilizados, devido às facilidades de implementação em campo, qualidade dos dados obtidos e profundidades de investigação, são o arranjo Schlumberger, Wenner e Dipolo-Dipolo. Estes layouts de campo são apresentados na FIGURA 2.1-2.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 2.1-2 – Principais arranjos de campo utilizados em levantamentos eletrorresistivos (a) Schlumberger, (b) Wenner e (c) Dipolo-Dipolo (Gallas, 2000).

As equações para o cálculo das resistividades aparentes são apresentadas na equação (9) para o arranjo Schlumberger, na equação (10) para o arranjo Wenner e na equação (11) para o arranjo dipolo-dipolo.

$$\rho_a = \frac{\pi(s^2 - a^2/4)}{a} \frac{\Delta V}{I} \quad (9)$$

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (10)$$

$$\rho_a = 2\pi \cdot a \cdot G \quad (11)$$

onde a constante G representa uma grandeza dependente somente do afastamento entre os dipolos de corrente e de potencial, “n”, e é calculado pela equação 12.

$$G = \frac{n \cdot (n+1)(n+2)}{2} \quad (12)$$

No Caminhamento Elétrico, os eletrodos são deslocados lateralmente, mantendo-se constante a geometria do arranjo. Comparativamente a uma sondagem elétrica vertical, seria o mesmo que se executar várias SEV's com seus centros próximos uns dos outros e ao longo de um mesmo perfil. A grande vantagem é a possibilidade de se reconhecer as variações laterais deste parâmetro físico (resistividade) a diferentes níveis de profundidades definidos pelos espaçamentos entre os eletrodos (levantamento 2D).

2.2 Arranjo Dipolo-Dipolo/Pseudo-seções de Resistividade

2.2.1 O arranjo

O arranjo dipolo-dipolo sintetizado na FIGURA 2.1-2 (c) mostra que os eletrodos deste arranjo devem ser implantados a equidistantes distâncias ($a = AB = MN$) e alinhados ao longo de um mesmo perfil (disposição colinear). As medidas são tomadas fixando-se os pares de eletrodos AB e executando sucessivas trocas de pares MN até a máxima abertura prevista n (n =nível de investigação: $n=1$ indica ser o primeiro par de eletrodos MN, $n=2$ indica ser o segundo par MN, e assim sucessivamente até o máximo nível investigado), que comumente varia em números inteiros de 1 a 5 ($n=1$ a $n=5$). A profundidade de investigação cresce com R e teoricamente corresponde a $\frac{1}{2} R$. A FIGURA 2.2-1 reinterpreta a diagramação de campo do arranjo dipolo-dipolo e as

posições dos pontos da subsuperfície amostrados para os pares de eletrodos MN crescentes, ou seja, níveis de profundidade sucessivamente mais profundos.

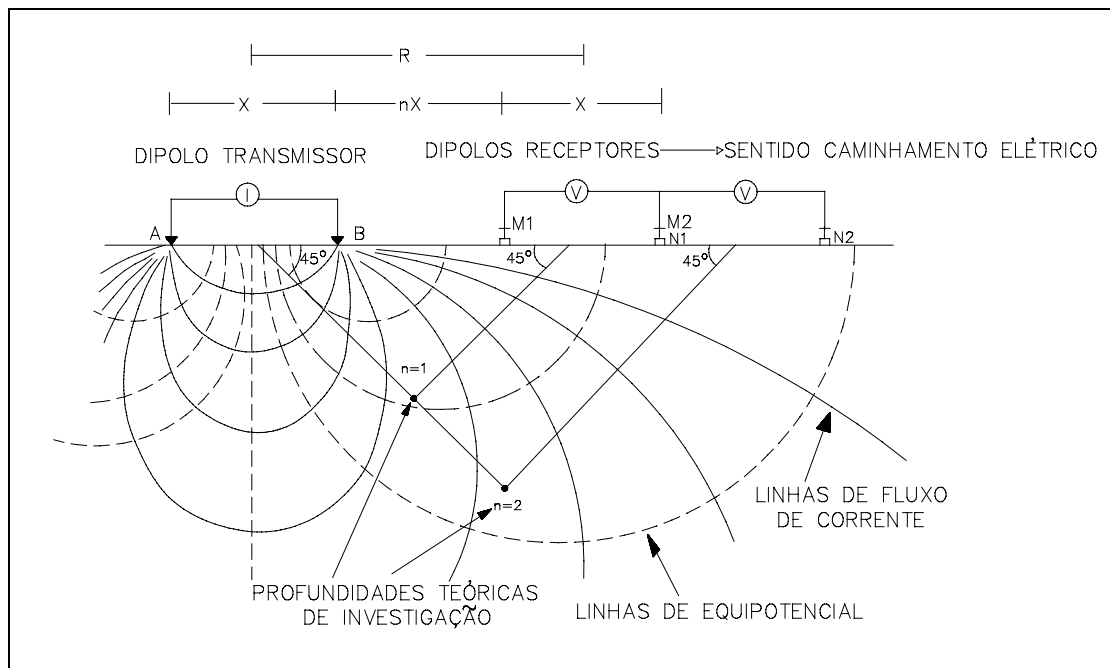


FIGURA 2.2-1. Arranjo dipolo-dipolo, posição dos pontos amostrados e síntese dos fenômenos físicos que ocorrem em subsuperfície devido à injeção de corrente elétrica na superfície. (Gallas, 2000)

Segundo Edwards (1977), a profundidade máxima de um arranjo dipolo-dipolo não deve ser superior a seis vezes a distância entre os eletrodos (seis níveis de investigação) de modo a garantir uma relação sinal ruído favorável. Entretanto, esta observação estava intimamente ligada à capacidade de leitura dos equipamentos e tecnologias disponíveis na época, uma vez que as leituras do potencial elétrico podem ser da ordem de milivolts (mV). Atualmente, dado o grande desenvolvimento da eletrônica e conseqüente aumento na precisão das leituras nos equipamentos, notadamente na corrente elétrica injetada ao solo e também nas leituras dos potenciais elétricos estabelecidos no terreno, é possível, e já praticado, obter níveis de investigações maiores, chegando mesmo a 10 vezes a distância entre os eletrodo do dipolo (Gandolfo, 2007).

2.2.2 Pseudo-seções

Os perfis (seções elétricas) obtidos pelo levantamento por caminhamento elétrico também são chamados de pseudo-seções. Isto se dá porque os dados obtidos, de diferentes níveis de investigação, não correspondem aos valores reais dos parâmetros resistividade elétrica, mas sim se refere a valores *aparentes*. Analogamente, as profundidades na seção

vertical são também apenas qualitativas. A FIGURA 2.2.2-1 apresenta uma pseudo-seção e seus pontos amostrados em diferentes posições da subsuperfície.

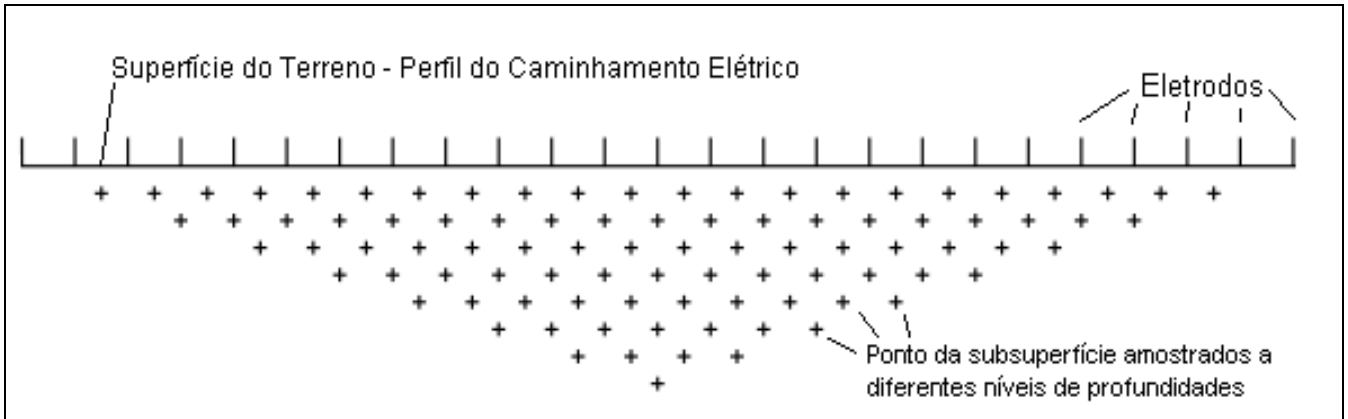


FIGURA 2.2.2-1 – Exemplo de uma pseudo-seção obtida com a execução de Caminhamento Elétrico onde (+) indicam as posições aparentes dos pontos de leituras. Cada ponto representa um valor da resistividade elétrica aparente, obtida através da equação (11). (Modificado de Res2Dinv, Geotomo Software - 2004).

Comumente a visualização de uma pseudo-seção se dá por uma associação dos valores das resistividades elétricas aparentes, a uma escala cromática. Este procedimento facilita sobremaneira a observação das variações, ao longo do perfil, deste parâmetro físico. A FIGURA 2.2.2-2 apresenta uma pseudo-seção associada a escala cromática.

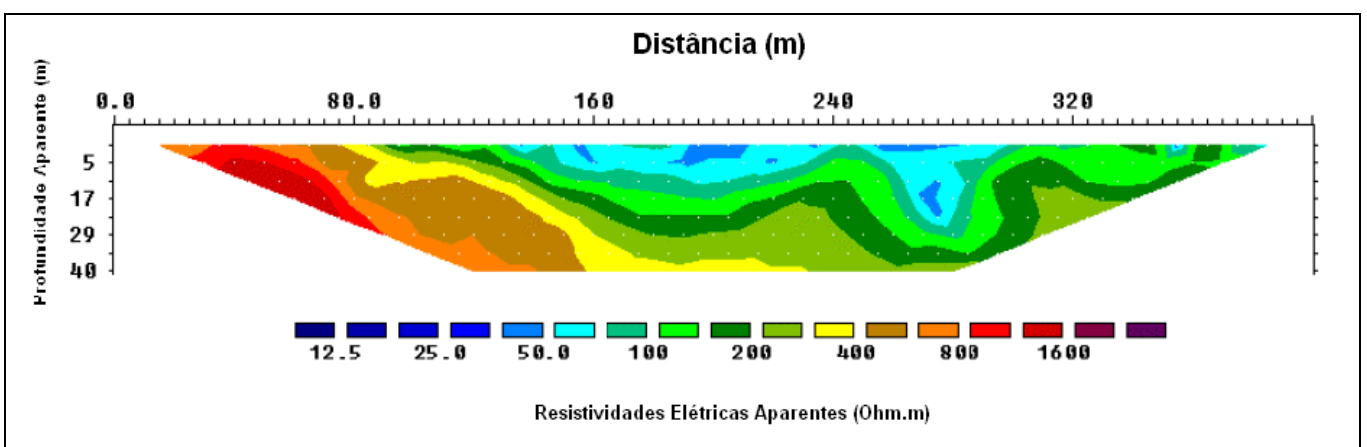


FIGURA 2.2.2-2 – Exemplo de apresentação de uma pseudo-seção com os valores das resistividades elétricas aparentes associados a uma escala de cores (Modificado de Res2Dinv, Geotomo Software - 2004).

Na interpretação dos dados das pseudo-seções obtêm-se informações qualitativas sobre a posição espacial dos corpos polarizáveis e, mais raramente, pode-se estimar o seu mergulho. Como decorrência, as informações são tão mais precisas quanto melhor a definição de uma anomalia de resistividade.

Deve-se lembrar, também, que todos os tipos de dados observados na natureza referem-se a algum fenômeno para o qual existe uma descrição formal (modelo). O modelo estabelece uma relação entre as grandezas observáveis e não observáveis. Na verdade, o modelo é representado em forma de uma função matemática que relaciona os parâmetros físicos (p.e. resistividade, velocidade, densidade, etc.) com os dados obtidos.

Desta forma, uma pseudo-seção de resistividades aparentes (dados observados), deve ser modelada por um processo denominado de *inversão*. A justificativa é que a inversão procura corrigir as distorções inerentes ao método e tende a aproximar a imagem 2D à situação real, facilitando sua interpretação.

O processo de inversão, por envolver um grande número de cálculos matemáticos, também se utiliza softwares especiais que permitem variar o número de iterações até que se chegue a um resultado aceitável e relativamente coerente com o prévio conhecimento geológico.

Com o advento de equipamentos digitais e dispositivos multieletrodos, tornou-se viável a integração entre os levantamentos na vertical e também na horizontal. Além disto, permitem a aquisição de muito mais pontos amostrados em subsuperfície. Tais procedimentos elevam o levantamento convencional de um determinado perfil (caminhamento elétrico) para o *Imageamento Geoelétrico*. Gandolfo (2007) discute em detalhe sobre a denominação adequada dada ao caminhamento elétrico com grande densidade de dados e sugere que, em português, se refira a ela como *imageamento elétrico*.

2.3 Inversão de dados eletrorresistivos

Como citado no subitem 2.2.2, os processos de inversão são aplicados para refinar e modelar os valores das resistividades elétricas que foram obtidos em um determinado levantamento. Desde que os dados sejam adquiridos em quantidade mínima de pontos de leitura, a inversão possibilita a obtenção de um melhor refinamento e posterior imagem mais próxima à da real distribuição dos materiais em superfície.

Para o exemplo da pseudo-seção apresentada na FIGURA 2.3-1, a inversão primeiramente executa a discretização do meio e a organização dos dados, tal como

foram coletados, respeitando suas posições espaciais. A discretização do meio nada mais é que uma transformação do subespaço amostrado pelos pontos de leituras em blocos com dimensões determinadas (matriz) FIGURA 2.3-2.

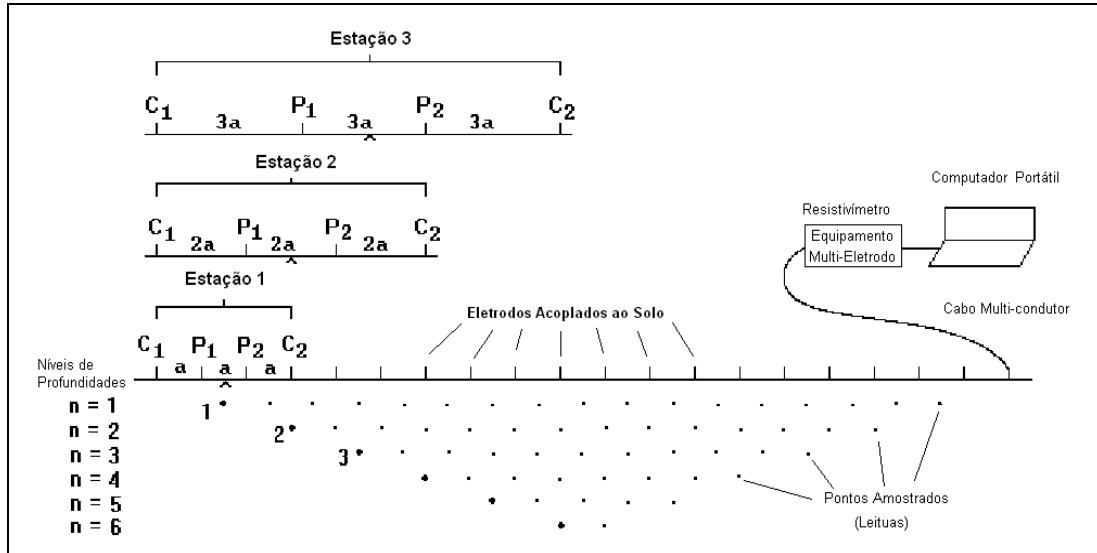


FIGURA 2.3-1 - Pontos amostrados (leitura das resistividades elétricas - pseudo-seção) em subsuperfície com uso de equipamento multieletrodo. Possibilidades de aquisições de grande quantidade de leituras (elevada densidade de pontos). (Modificado de Res2Dinv, Geotomo Software - 2004)

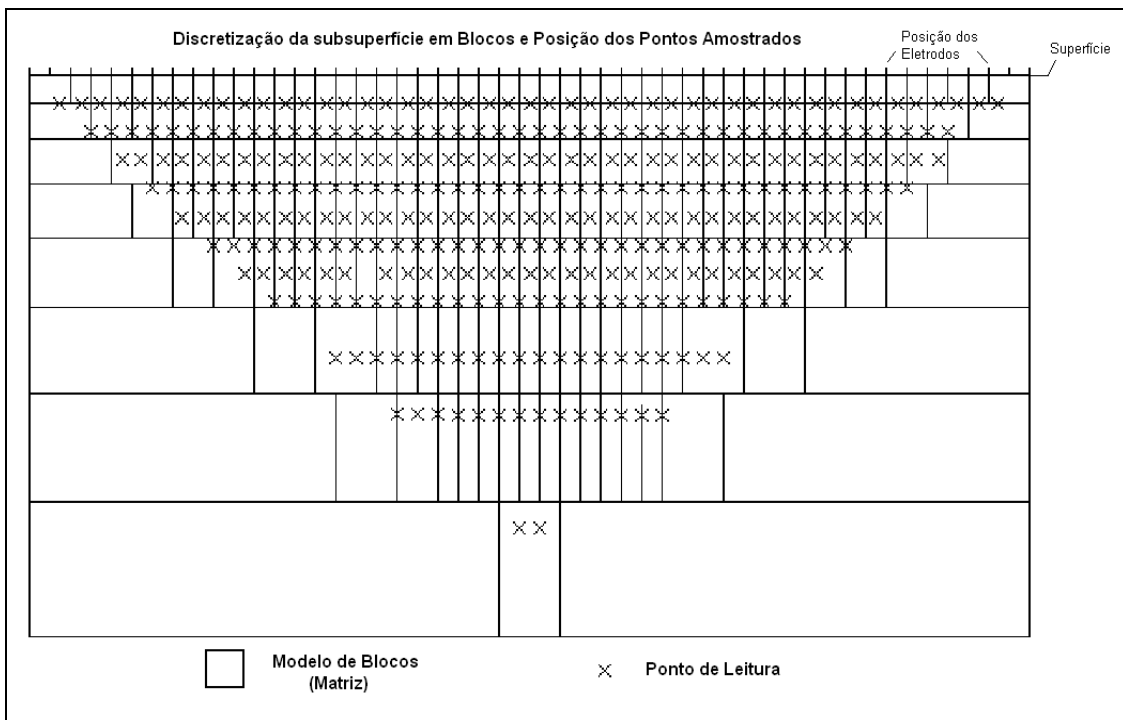


FIGURA 2.3-2. Discretização do subespaço - Modelo de Blocos da Subsuperfície. (Modificado de Res2Dinv, Geotomo Software - 2004)

Com a aplicação dos processos automáticos de inversão, ou seja, a interação entre todos os blocos e dos valores de resistividades das vizinhanças, chega-se a um modelo matemático representativo do meio (Loke, 1996). Após a interpolação destes valores calculados para a área de abrangência do modelo, o que se consegue é a imagem da real distribuição dos valores das resistividades elétrica (FIGURA 2.3-3). Isto é, a distribuição mais próxima da realidade da subsuperfície amostrada pelo método eletrorresistivo.

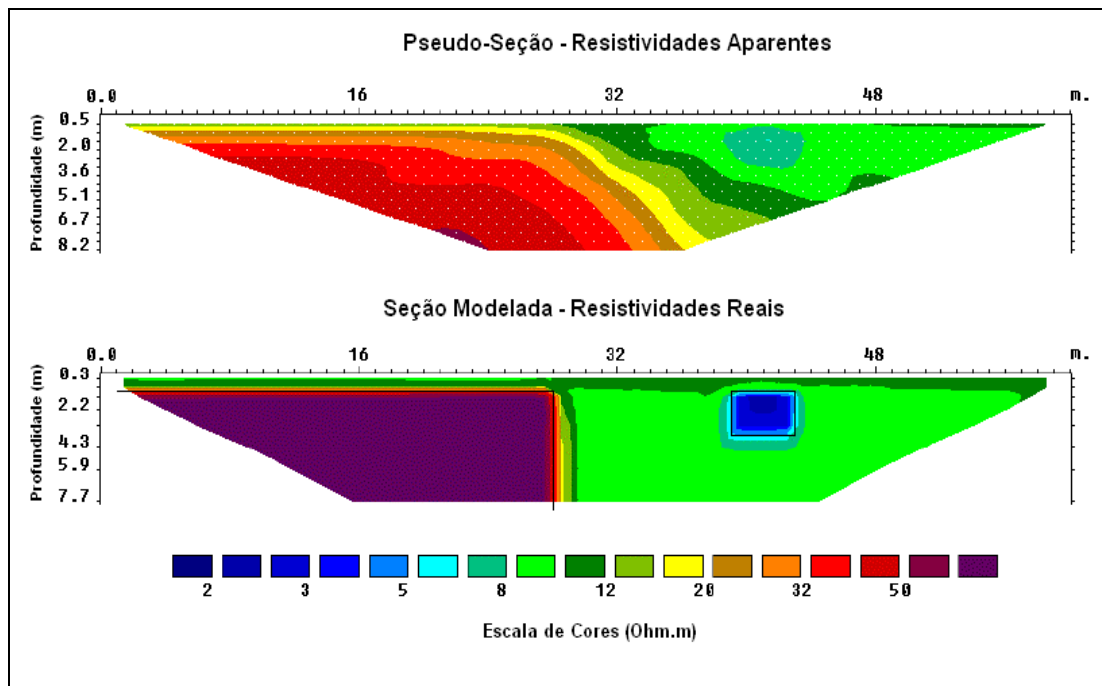


FIGURA 2.3-3 - Exemplo de Seção Sintética Modelada simulando a identificação de uma melhor imagem da subsuperfície (refinamento) evidenciando a ocorrência de uma falha e tubulação, após inversão dos dados (Modificado de Res2Dinv, Geotomo Software - 2004)

2.4 Imageamento Geométrico

O imageamento geométrico nada mais é que um avanço de uma técnica de investigação consagrada, *caminhamento elétrico*, mas com elevada quantidade de medidas das resistividades elétricas representativas dos materiais da subsuperfície (FIGURA 2.4-1). Este aumento de leituras tornou-se operacionalmente possível graças à evolução e precisão dos equipamentos geofísicos com tecnologias que fazem a comutação automática dos eletrodos de emissão de corrente, assim como multiplexam os pares de eletrodos de medidas de potencial. Em adição, os dados digitalizados são armazenados em arquivo com formato compatível aos principais softwares de inversão.

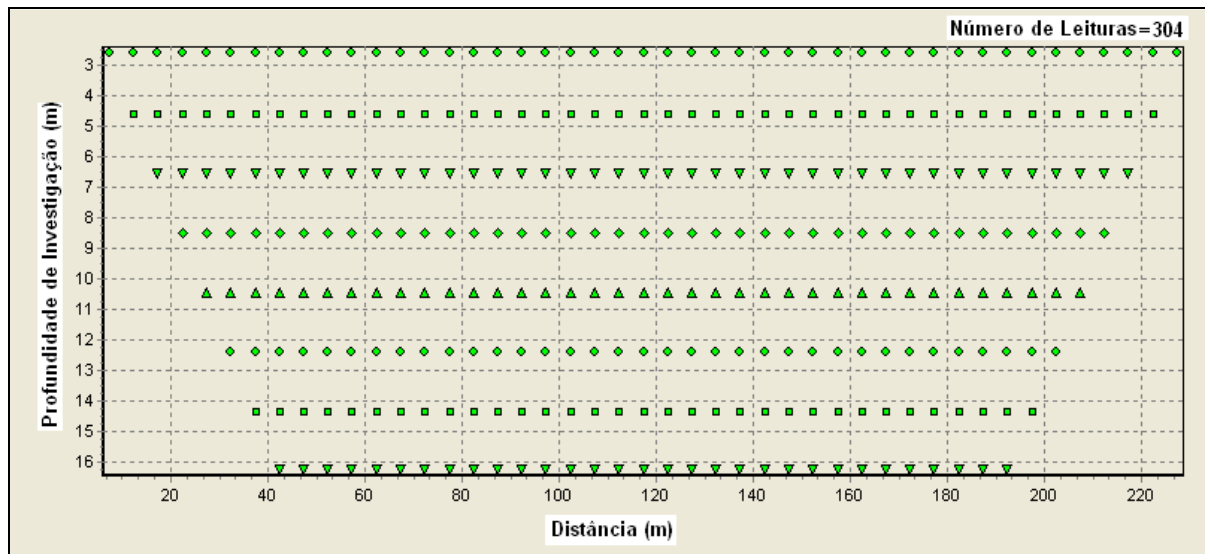


FIGURA 2.4-1 - Simulação para aquisição de leituras das resistividades elétrica com alta densidade de pontos. Estimativa da profundidade real a ser investigada e posição dos pontos de leituras. A grande quantidade de leituras eleva o levantamento para o *Imageamento Geométrico*. (Adaptado de Iris Instruments Software, 2006)

Sabe-se que, quanto maior a densidade de pontos amostrados em subsuperfície, maior será a resolução da imagem da distribuição desses materiais, uma vez que se poderá adotar valores de resistividades individualizados para células com menores dimensões.

Os levantamentos executados pelo imageamento geométrico, em duas ou três dimensões (2D ou 3D), geralmente, são efetuados ao longo de perfis e os resultados obtidos se relacionam entre si através de um estudo em planta a uma profundidade determinada, ou ainda, através de seções com várias profundidades de investigação.

2.5 Eletroresistividade em Ambientes Aquáticos

São muitas as aplicações das técnicas geofísicas como subsídios a estudos de engenharia. Não é de hoje a necessidade de se obter informações mais específicas sobre a subsuperfície de forma a colaborar para o fechamento de um modelo que melhor irá atender e antever as necessidades de engenharia para cada etapa de um projeto, tanto no âmbito de inventário, básico ou executivo.

Da mesma forma há carência de informações em ambientes aquáticos, tanto em zonas costeiras quanto em rios e reservatórios. Na literatura existem várias publicações

de aplicações bem sucedidas de técnicas geofísicas adaptadas aos ambientes aquáticos para os mais variados objetivos (e.g. Souza, 2006).

Com a revolução tecnológica das últimas décadas, especificamente da eletrônica e informática, já foram disponibilizados no mercado equipamentos, acessórios e softwares capazes de realizar aquisições de dados indiretos em ambientes aquáticos. Acompanhando tal tendência, a geofísica e suas técnicas de investigação também se desenvolveram e integraram outras tecnologias como o GPS e ecobatímetros.

A grande vantagem da geofísica em relação aos demais métodos de estudos em ambientes aquáticos continua sendo a grande agilidade nos levantamentos de campo, densidade dos dados coletados, obtenção de perfis contínuos e a possibilidade de mapeamentos de grandes extensões em curto espaço de tempo, otimizando a relação custo/benefício do projeto.

Tradicionalmente o método sísmico era praticamente o método mais adaptado para o mapeamento de detalhe em ambientes subaquáticos, muitas vezes com ótimos resultados (Souza, 2006). Recentemente, no entanto, outras técnicas geofísicas ficaram disponíveis neste ambiente devido à entrada no mercado de equipamentos e acessórios que permitem operação em tais situações, como é o caso dos eletrorresistivímetros.

O mapeamento por eletrorrestividade em lâminas d'água é efetuado através de cabos especiais que são arrastados na superfície da água (maior agilidade nas aquisições) ou mesmo sobrepostos no leito do local a ser estudado (menor produtividade uma vez que seu deslocamento é efetuado afundando segmento de cabo após segmento, até atravessar toda a extensão a ser investigada, além de correr o risco da possibilidade de penetração de água no interior dos cabos, dependendo da pressão que a coluna d'água exercer nos terminais supostamente estancados). O resultado é um perfil contínuo que apresenta as variações da coluna d'água, o contorno do fundo do rio (obtidas pela batimetria) e a imagem das distribuições das resistividades elétricas dos materiais abaixo do leito do rio e mesmo do mar. A FIGURA 2.5-1 apresenta duas seções geoeletricas obtidas em ambiente aquático com a utilização de eletrorresistivímetro digital multicanal e cabo multieletrodo arrastado na superfície d'água. Nas seções é possível observar a superfície do fundo e as distribuições das resistividades elétricas da subsuperfície do leito do rio e do mar.

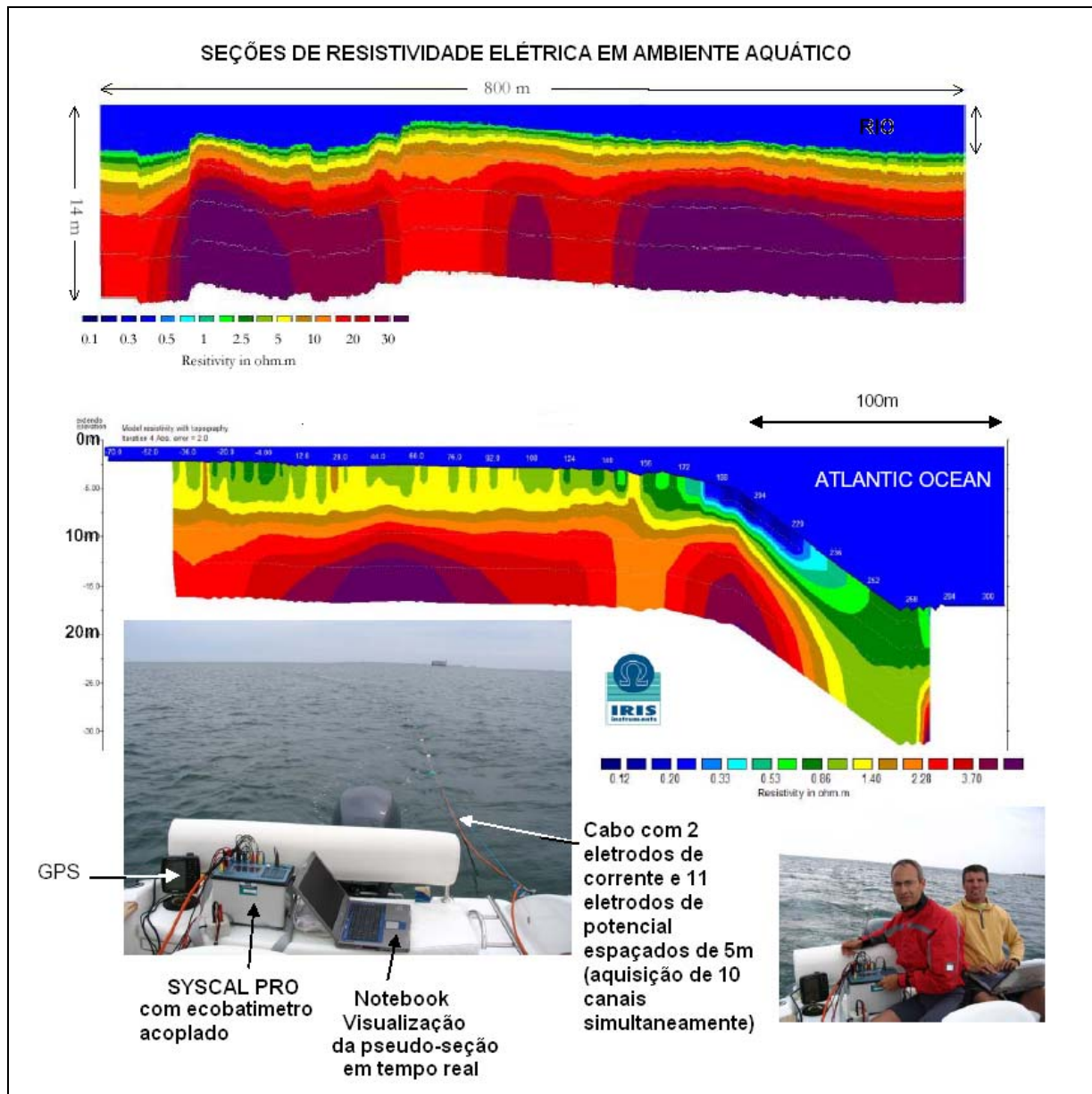


FIGURA 2.5-1 – Ilustração de duas seções de Imageamento Geoelétrico obtidas utilizando o equipamento Syscal Pro integrado a GPS e eco-batímetro. Cabo multieletrodo arrastado na superfície da água. (Adaptado de Iris Instrument, 2006)

2.6 Batimetria

O uso de técnicas batimétricas também passou por revoluções devido à crescente demanda e ao advento de novas tecnologias. O que se fazia através de medidas pontuais do fundo com a utilização de pesos amarrados a trenas, hoje pode ser feito através das técnicas de propagação de ondas acústicas para a definição, com nível aceitável de precisão, da coluna d'água.

O princípio da batimetria acústica é o mesmo da física que rege a propagação de ondas em um determinado meio. A fonte batimétrica nada mais é que um transdutor com fonte e receptor acoplados em um único sistema. As ondas acústicas emitidas são sinais sonoros de altas frequências, normalmente acima de 20 kHz, transmitidos ao meio através da fonte que costuma ser posicionada na superfície da água e mesmo acopladas no casco da embarcação. Estas ondas viajam na coluna d'água a velocidades da ordem de 1400 m/s a 1500 m/s, dependendo da salinidade, temperatura e pressão (Telford,1976). Os feixes de ondas atingem o fundo do rio e são refletidos, de volta à superfície, tal qual um raio de luz refletido por um espelho. O que o equipamento eco-batímetro faz é determinar o tempo de percurso gasto por esta onda, com precisão, para percorrer a coluna d'água (tempo de ida e volta) e calcula a espessura da coluna d'água, considerando sua velocidade de propagação. A FIGURA 2.6-1 apresenta um exemplo real de seção batimétrica obtida por esta técnica.

No meio científico existem diversas publicações sobre as técnicas e equipamentos disponíveis, bem como os resultados obtidos (Souza, 2006;). As frequências de operação dos equipamentos de eco-batimetria variam entre os fabricantes, os objetivos e as profundidades a serem prospectadas. Em águas de rios, com elevadas resistividades elétricas se comparadas às de mares e oceanos, um equipamento usual e com grande confiabilidade são os eco-batímetro com dupla frequência de operação (duplo feixe). Neste tipo de equipamento, as frequências usuais de operações estão entre 50 e 200kHz, garantindo ótimas resoluções tanto em profundidades acima de dez metros (50kHz), como em condições mais rasas (200kHz). Em situações a cerca de um metro ou menos há imprecisões nas determinações do equipamento por saturação do sinal refletido dada à proximidade entre a fonte e o refletor, visto que o sinal se dá através da emissão contínua de pulsos acústicos (fonte coerente).

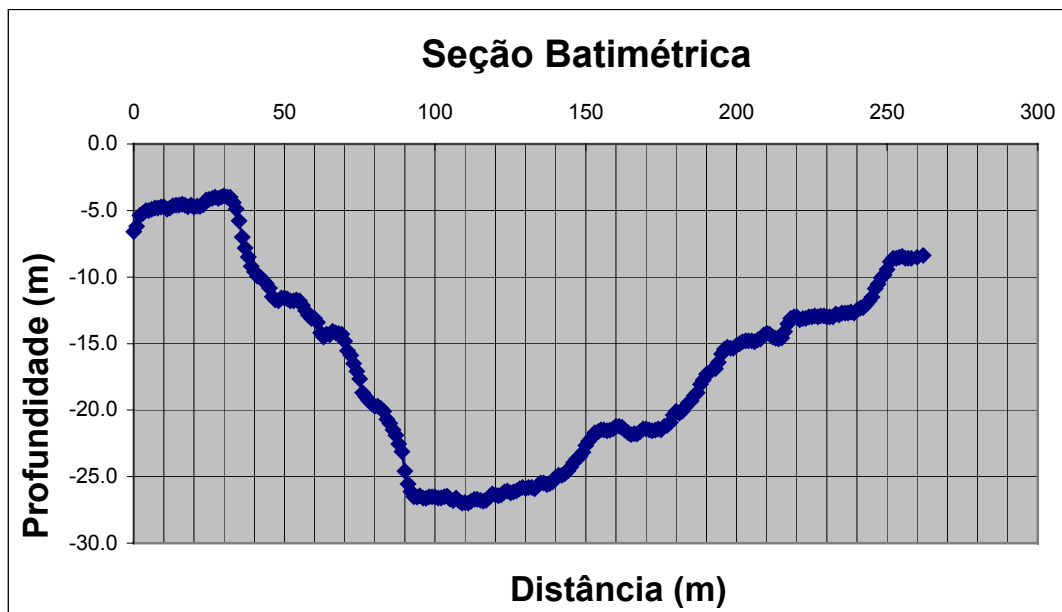


FIGURA 2.6-1 – Seção batimétrica típica após processamento, obtida por eco-batímetro de duplo feixe com elevada densidade de pontos (Levantamento realizado nas águas do rio São Francisco com varredura a cada 2m navegados na superfície do rio).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos geofísicos de prospecção e investigação da subsuperfície já são amplamente estudados e existem disponíveis diversas literaturas a disposição para consultas (Orellana, 1972, Edwards, 1977, Dobrin, 1981, Parasnis, 1986, Telford, *et al*, 1990, Sharma, 1986, Loke; 1996, Griffiths, 1993). Mesmo os estudos de áreas submersas através de técnicas geofísicas não são novidades no meio científico, podendo-se encontrar também diversas publicações disponíveis a cerca do assunto.

Entretanto, nota-se que quando o assunto abordado é a utilização do método eletrorresistivo aplicado a estes fins não existem tantas publicações disponíveis. Isto se deve ao fato que o método, nas décadas de 90 e início dos anos 2000, foi acometido por diversas modernizações e revisões de aplicabilidades em ambientes aquáticos devido às renovações tecnológicas, de equipamentos a softwares de tratamento dos dados e interpretações, o que possibilitou sua praticidade de coleta dos dados. Desta forma, somente publicações recentes foram abordadas neste texto.

A seguir são comentadas algumas literaturas pesquisadas no âmbito deste trabalho que abrangem desde os fundamentos da técnica geofísica a assuntos relacionados à prospecção em ambiente aquático.

Griffiths e Barker (1993) estudaram mais detalhadamente as opções de inversão dos dados e refinamento do modelo aos dados da eletrorresistividade em perfis executados nos locais com complexa situação geológica obtendo as melhores imagens possíveis bem como as suas distorções revelando as grandes variações do parâmetro eletrorresistivo em subsuperfície.

Loke e Barker (1996) apresentaram à comunidade uma versão de algoritmo matemático para a inversão de dados eletrorresistivos e polarização induzida. Começa nesta época, uma nova abordagem para os dados da eletrorresistividade com a obtenção de imagens dos perfis elétricos mais refinados, em substituição à simples apresentação das pseudo-seções.

Gallas (2000) em sua defesa de doutorado estudou as principais técnicas da eletrorresistividade e os dispositivos eletrônicos disponíveis, e exemplo de aplicações a questões ambientais, de engenharia e hidrogeologia, concluindo que as técnicas da eletrorresistividade são de grande importância nos estudos do subsolo e que cada técnica apresenta recomendação dependente dos objetivos.

Guiton e Claerbout (2004) analisaram as ocorrências de ruídos em levantamento batimétrico com alta densidade de dados coletados no Mar da Galileia e, para obterem as determinações do fundo do lago, fizeram a inversão dos dados com adição de operadores interativos dentro da matriz para suavizarem os ruídos. Também concluíram que é mais fácil reduzir as condições que geram ruídos aos dados que tentar filtrá-los nos processamentos.

Souza (2006) fez extensa revisão de aplicabilidade dos métodos geofísicos atualmente utilizados em prospecção de áreas submersas. Trata-se de um trabalho que serve de referência para consultas das diversas técnicas que já foram aplicadas nos estudos do fundo e subfundo dos rios e mares. Suas conclusões foram compiladas em quadros elucidativos para a rápida pesquisa sobre qual técnica geofísica tem maior aplicabilidade dependendo das condições das águas, espessuras das colunas d'água, etc.

Gandolfo (2007) efetuou uma extensa revisão do método da eletrorresistividade e suas aplicações utilizando equipamentos com tecnologia de aquisição de dados com alta densidade, sistemas multieletrodos, sugerindo que o caminhamento elétrico assim executado seja chamado de imageamento elétrico.

YANG *et al* (2007) aplicaram eletrorresistividade em duas áreas submersas, com utilização de equipamento multieletrodo além de GPR (Ground Penetration Radar). Concluíram que a técnica adaptada para ser executada na superfície da água mapeou estrutura do subfundo, mas não determinou com precisão a coluna d'água sendo que esta foi melhor determinada pelo GPR.

4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DOS ESTUDOS

Os levantamentos de campo foram executados nas águas do rio São Francisco, importante bacia hidrográfica, mais especificamente próximos ao povoado de Riacho Seco, estado da Bahia. A finalidade do levantamento foi verificar a aplicabilidade da técnica geofísica e subsidiar assim o conhecimento geológico local, sob as águas do rio, objeto de pesquisa para aproveitamento hidrelétrico (AHE Riacho Seco).

Os trabalhos se desenvolveram totalmente nas águas do rio no entorno da ilha de Inhanhum, situada entre o povoado de Riacho Seco (margem direita) e o estado do Pernambuco (margem esquerda), na seguinte coordenada UTM básica:

Norte=9.029.000;

Leste=425.000.

A FIGURA 4-1 apresenta a situação do local, que está inserido na região nordeste do Brasil, e a FIGURA 4-2 apresenta, em detalhe, os locais dos estudos do aproveitamento Riacho Seco com eixos de implantações previstos.



FIGURA 4-1 - Localização do estado da Bahia e detalhe da localidade de Riacho Seco, às margens do rio São Francisco.

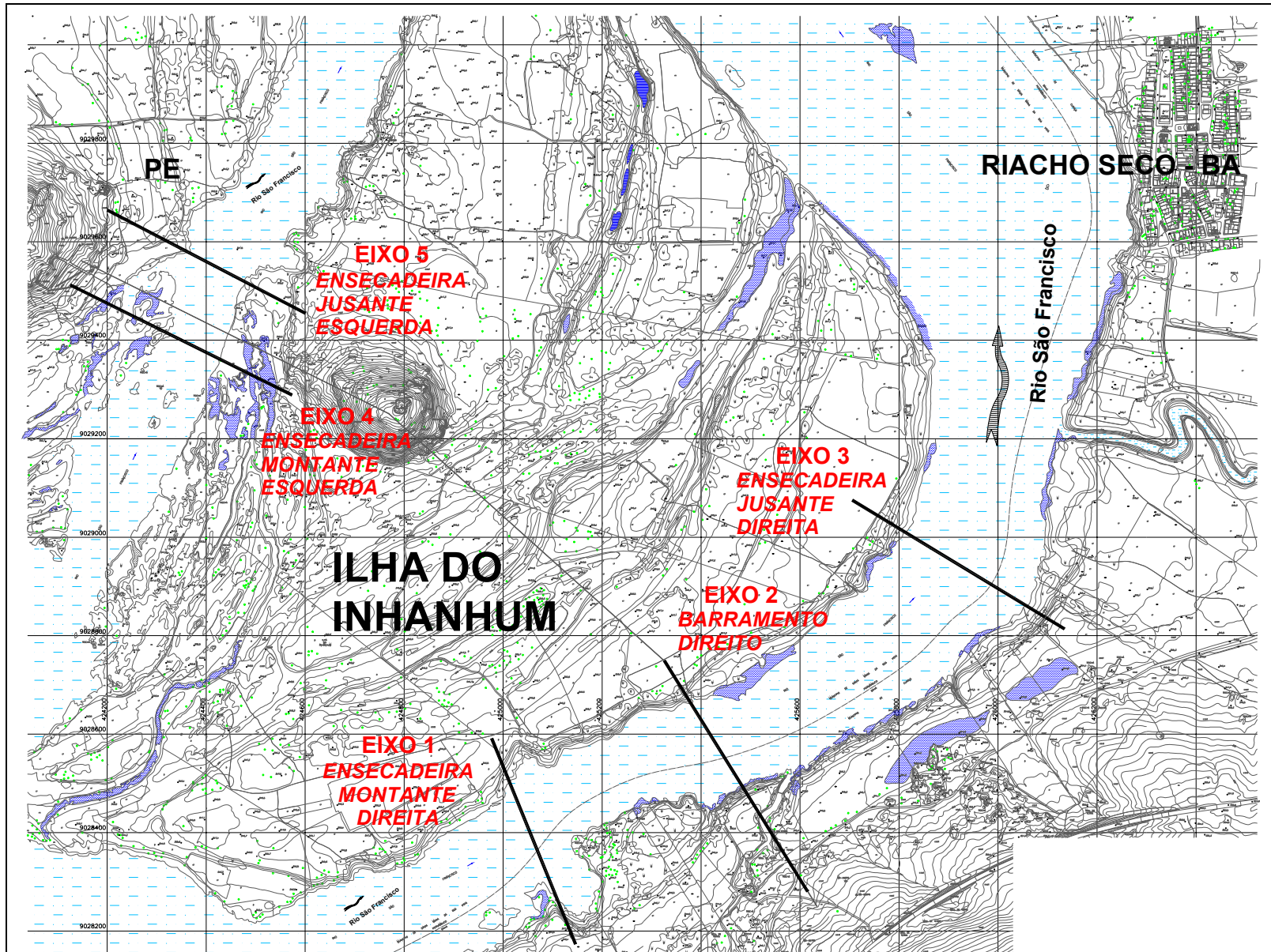


FIGURA 4-2 - Planta de detalhe dos locais de trabalho com localização dos cinco eixos previstos do AHE Riacho Seco e o povoado de mesmo nome às margens do rio São Francisco no estado da Bahia.

5. ASPECTOS GEOLÓGICOS

5.1 Generalidades

O local estudado está inserido nos domínios da Província São Francisco, como apresentado na FIGURA 5.1-1 (Carta Geológica do Brasil ao milionésimo, Folha Aracajú SC.24, escala 1:1.000.000). Na região, há o predomínio de material rochoso de idade Pré-Cambriana bem como amplas cobertas fanerozóicas, pertencentes aos períodos Terciários e Quaternários.

O local dos trabalhos e entorno são predominantemente acometidos por depósitos de *Aluvião* e *Coluvião* (Quaternário - Q2a). Os aluviões presentes são especialmente significativos ao longo do rio São Francisco e na foz dos principais afluentes. São basicamente constituídos de areias finas e matrizes argilosas. Já os colúvios são produto de desagregação das rochas existentes e estão presentes nas encostas mais inclinadas.

As unidades mais antigas correspondem a uma seqüência representada por ocorrências de ortognaisses, migmatitos e rochas ultrabásicas denominado por Complexo Sobradinho e Remanso (Arqueano Inferior, 3200 Ma) sobreposto por rochas supracrustais pertencentes ao grupo Santa Maria da Boa Vista e ortognaisses tonalíticos a granitos do Complexo Riacho Seco (2920 Ma). Contatos com granitos gnaissificados do grupo Sobradinho-Remanso (Proterozóico Inferior, 2300-2050 Ma) ocorrem notadamente na região da Ilha Inhanhum e em direções preferenciais NW-SE. Já a nordeste da área, ocorrem contatos com rochas pertencentes ao Complexo Belém do São Francisco (Província Borborema), caracterizado por ortognaisses mais recentes (1070 Ma). A FIGURA 5.1-2 apresenta uma simplificação da seqüência litoestratigráfica do local estudado.

A principal feição estrutural presente na região é o Alto Tectônico Pernambuco – Alagoas, disposto na direção geral leste-oeste. Esse lineamento, evidenciado por zonas de cisalhamento, milonitização e dobras anticlinais e sinclinais, situa-se na porção norte da área de estudos (CHESF, 1999).

A área contida no mapa geológico regional engloba algumas jazidas minerais, além de mineralizações de menor porte. Dentre essas, destacam-se ocorrências de cobre disseminado em rochas nas cercanias da cidade de Riacho Seco, próximas ao Distrito Cuprífero de Curaçá.

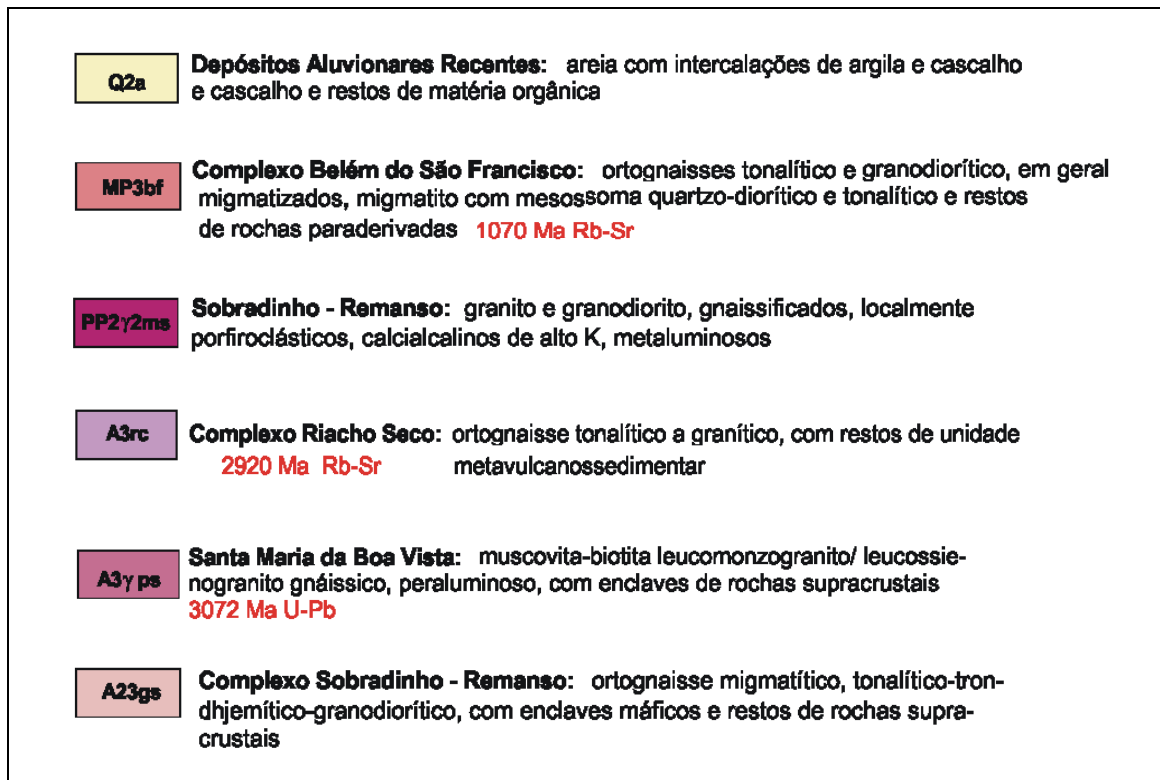


FIGURA 5.1-2 – Seqüência estratigráfica simplificada da Carta Geológica do Brasil, escala 1:1.000.000, 2004.

5.2. Aspectos Estruturais

O Alto Tectônico Pernambuco – Alagoas constitui a principal unidade geotectônica da área. Possui seu limite setentrional em parte marcado pelo Lineamento de Pernambuco e ao sul sua delimitação é feita com as rochas metassedimentares do Grupo Salgueiro-Cachoeirinha. De modo geral, o maciço se dispõe na direção leste-oeste enquanto as lineações dos migmatitos e a orientação geral de suas porções graníticas se dispõem nas direções NE-SW e ENE-WSW. Durante o Ciclo Brasileiro (700-500 Ma) o maciço funcionou como antepaís dos dobramentos desenvolvidos em suas bordas nos estágios principais desse evento. Posteriormente ocorre outra fase tectônica, caracterizada por falhas inversas e de empurrão, desenvolvendo intensa foliação gnáissica. A fase tectônica seguinte é de rejeito direcional, comandada pelo sistema de falhas ligado ao Lineamento de Pernambuco.

Pouco posterior a essa fase de deslocamentos direcionais, houve uma etapa de relaxamento tensional, sendo desenvolvido um sistema de juntas (NNW, NW, NNE, NE),

em parte preenchido por intrusivas fissurais. Esse sistema influenciou de forma conspícua a organização da rede hidrográfica atual.

O Lineamento de Pernambuco é caracterizado, na área, por fraturamento intenso de direção NW. Uma faixa contínua de cisalhamento, incluindo zonas de milonitos e ultramilonitos, além de dobramentos especiais, fortemente marcados nas unidades litológicas adjacentes, evidencia a zona de ocorrência do lineamento. Esse lineamento é uma das respostas às tensões tectônicas impostas ao complexo do Nordeste brasileiro, desenvolvidas entre as fendas sul e norte-Atlântica, como consequência da ligação dos blocos Brasileiro e Africano. Essa feição coincide aproximadamente com a extremidade setentrional da fenda sul-atlântica, como existia durante o cretáceo inferior. O bloco ao sul da falha permaneceu livre para o deslizamento no sentido oeste, enquanto o bloco ao norte se manteve estático.

Situada na porção oeste da área, a Faixa de Dobramentos de Riacho do Pontal:, é caracterizada por ser a ocorrência das rochas metassedimentares do Grupo Salgueiro-Cachoeirinha. Delimita-se a leste com as rochas metamórficas do Alto Tectônico Pernambuco-Alagoas, e a norte seu limite é formado ao longo do Lineamento de Pernambuco. Duas seqüências metassedimentares podem ser distinguidas nessa faixa: uma inferior psamítica / subordinadamente pelítica e outra superior pelítica / psamítica. Seu contato com as rochas do Alto Pernambuco–Alagoas é marcado por dobramentos apertados, associados a falhas inversas e de empurrão, com vergências para sul e sudeste.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Equipamentos e acessórios utilizados

Os trabalhos de campo foram realizados embarcados, em barco de madeira típico da região, comumente encontrado nas redondezas de Riacho Seco (BA), movido a motor diesel, onde foi possível acomodar com facilidade os equipamentos utilizados, que foram: Eletrorresistivímetro multieletrodo Syscal Switch Pro, fabricado pela IRIS Instruments, integrado ao equipamento GPS de navegação, marca Garmin e modelo GPSMAP 298, eco-batímetro de duplo feixe - 50/200khz (40/10 graus de angulação de cone; sensor de temperatura da água acoplado). O equipamento Syscal Switch Pro consiste de um resistivímetro com potência nominal de 250 W (1.000V, 2,5A) e resolução das leituras dos potenciais elétricos de $1\mu\text{V}$.

O sistema permitiu executar, simultaneamente, através de seus dez canais de leituras, aquisições das resistividades elétricas em dez níveis de profundidades, referenciadas às respectivas coordenadas UTM fornecidas pelo GPS e informações das espessuras da lâmina d'água (eco-batímetro) ao longo das seções navegadas (FIGURA 6.1-1).

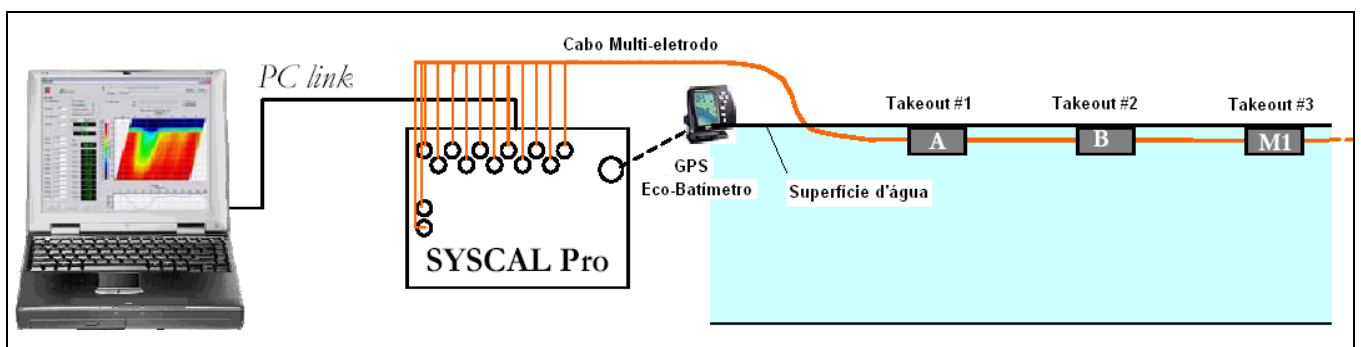


FIGURA 6.1-1 – Esquema de interconexão do sistema integrado (Adaptado de Iris Instruments, 2006)

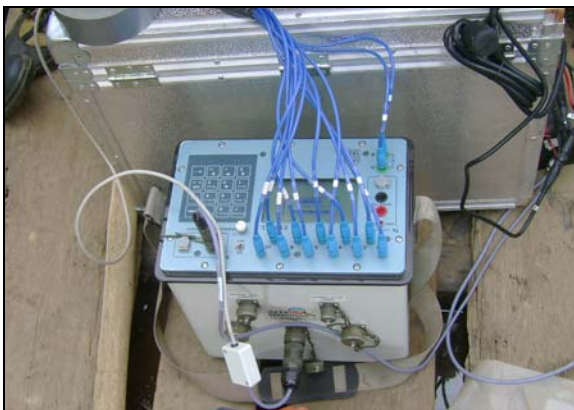
Todo o sistema foi gerenciado por software específico (Iris Instruments, 2006) que monitorava os processos de aquisição como também apresentava na tela do computador, em tempo real, o perfil da pseudo-seção e da superfície do fundo do rio (perfil batimétrico). A FIGURA 6.1-2 ilustra todo sistema embarcado.



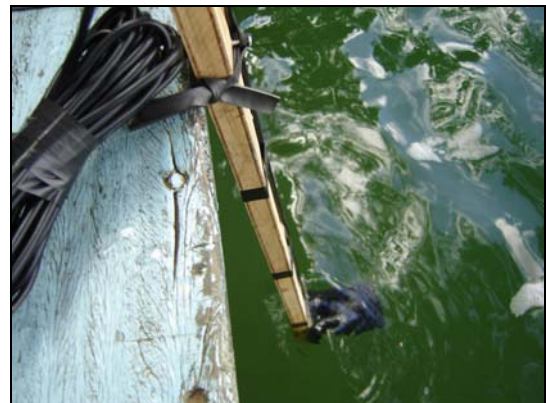
(A)



(C)



(B)



(D)

FIGURA 6.1-2 - Detalhe da total integração do sistema utilizado para as aquisições dos dados de GPS/Batimetria (A), dos valores das resistividades elétricas através do equipamento Syscal Pro (B), adaptação do transdutor do batímetro e sua fixação na lateral da embarcação, logo abaixo da linha da água (C) e (D).

O arranjo eletródico utilizado foi o dipolo-dipolo (DpDp), mesmo tipo de arranjo utilizado em ambientes terrestres, uma vez que este arranjo favorece sobremaneira o mapeamento das variações laterais das resistividades elétricas (Gallas 2000).

O cabo aquático utilizado era para 13 eletrodos (*takeouts*) construídos em grafite, material este que diminui a resistência de contato entre os eletrodos e o meio aquático. O espaçamento entre *takeouts* utilizado foi de 5 m (FIGURA 6.1-3). Dois dos eletrodos eram utilizados para emissão de corrente (AB), enquanto os outros onze formavam os dez dipolos de medida de potencial (MN). Com esta configuração, a profundidade de investigação, levando-se em consideração a espessa coluna d'água que apresentou o rio em determinados trechos, foi de até 15 m abaixo da superfície do fundo do rio (Loke, 1996).



(a)



(b)

FIGURA 6.1-3 - Vista parcial do cabo multieletrodo sendo colocado na água (a); e detalhe de um dos *takeouts* de grafite e bóia acoplada para garantir a flutuabilidade do cabo (b).

6.2 Métodos

A logística de aquisição adotada foi a seguinte: colocação do cabo multieletrodo na água, com bóias acopladas nas proximidades de cada *takeout* para garantir a flutuação do conjunto (este procedimento evitou possíveis problemas de enrosco do cabo caso o mesmo afundasse devido a uma parada do barco ou mesmo diminuição da velocidade que facilitassem o afundamento. Também garantiu que o cabo ficasse a uma profundidade constante; instalação, junto ao casco da embarcação, do transdutor do eco-batímetro, com a fonte situada logo abaixo da superfície da água; instalação do equipamento GPS interligado tanto ao eco-batímetro como ao resistímetro; conexão de todos os terminais do cabo multieletrodo ao resistímetro respeitando-se a ordem dos canais; conexão do resistímetro ao notebook para configurar, através do software específico, os parâmetros de aquisições e gerenciar todo o levantamento; navegar ao longo do eixo, mantendo o cabo esticado e garantindo, assim, o espaçamento de 5m entre *takeouts*; direcionar a navegação através do uso do GPS, com as coordenadas dos levantamentos previamente inseridas, e efetuar as aquisições através do software específico.

Após o início da navegação, e também início do levantamento da seção (progressiva “zero metros”), o sistema passava a adquirir dados das resistividades elétricas, em dez níveis de profundidades, bem como as coordenada UTM e espessuras da lâmina d’água de forma automática e a cada 2 (dois) metros percorridos na superfície da água, distância esta fornecida pelo GPS. Através do software, o *notebook* então recebia todos os dados em aquisição, organizava automaticamente as informações em

arquivos tipo planilha para cada seção navegada, além de apresentar os resultados em tempo real na tela.

6.3 Dificuldades de Implementação e Soluções Adotadas

No item anterior foram relacionados os procedimentos mais indicados e que deveriam ser executados sem maiores complicações. Porém a realidade do local e a natureza do rio impuseram complicadores logo no início dos trabalhos e que tiveram que ser corrigidos e mesmo adequados à realidade. Por exemplo, os testes preliminares em navegação, já com todo o sistema a bordo, evidenciou que, acima de certa velocidade, a turbulência da água junto ao sensor do eco-batímetro ocasionava ruídos e ocorrências da perda da aquisição da batimetria. Como a embarcação era toda artesanal, característica da região, não foi possível instalar o transdutor em outra parte sem comprometer a funcionalidade e agilidade nas manobras da embarcação, fundamentais para o sucesso do levantamento (FIGURA 6.3-1).



FIGURA 6.3-1 - Detalhe do transdutor do eco-batímetro adaptado na lateral da embarcação em navegação com velocidade acima de 5 km/h. Turbulência junto ao sensor favorecendo ocorrências de ruídos nas leituras da batimetria.

Nestes primeiros testes de campo, os perfis batimétricos foram acometidos por níveis de ruídos inaceitáveis e, por vezes, não foi possível definir a profundidade do fundo. Ruídos são comuns nestes levantamentos batimétricos com alta densidade de dados, mas é possível minimizar as causas, por exemplo, otimizando a velocidade de navegação e conseqüente turbulência da água (Guitton & Claerbout, 2004). Desta forma, foi verificado que a velocidade máxima a ser navegada não poderia superar a 5 km/h, sendo que o compromisso ótimo foi de 3km/h. Ressalta-se que estas faixas foram obtidas de forma empírica e nas condições de correnteza em que o rio se apresentava na ocasião

dos levantamentos. A FIGURA 6.3-2 (a) apresenta uma seção batimétrica executada com velocidade bem acima de 5 km/h, ou seja, com fortes turbulências no sensor. Em (b) uma outra seção com a redução da velocidade para 3 km/h, melhor condição sinal/ruído e produção.

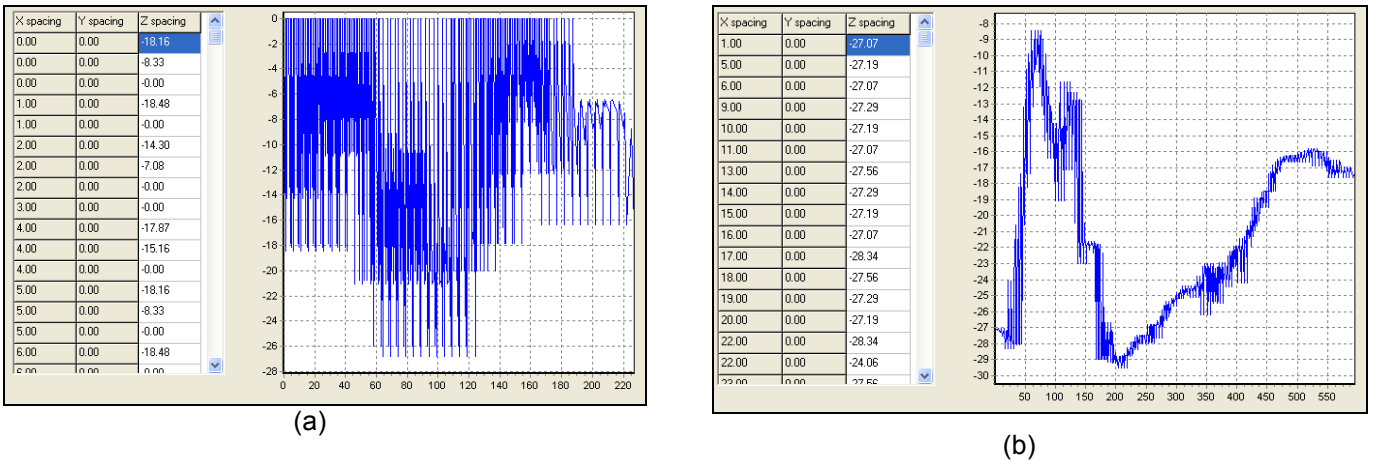


FIGURA 6.3-2 – Testes de ruído nos dados batimétricos: (a) Aquisição em velocidades acima de 5 km/h ocasionando forte incidência de ruídos. Em (b) a velocidade de navegação foi de 3 km/h ocorrendo redução significativa do nível de ruído nos dados coletados.

Outro empecilho relevante e associado ao problema da batimetria foi a dificuldade de se navegar nos eixos previstos e em linha reta, cortando ortogonalmente a correnteza do rio. Ocorreu que o cabo multieletrodo, arrastado pela embarcação e com extensão de 75m atrás da proa da embarcação, aliado às baixas velocidades de travessias para a redução dos ruídos na batimetria, era derivado à jusante. Algumas trajetórias obtidas com esta deriva podem ser vistas na FIGURA 6.3-3.

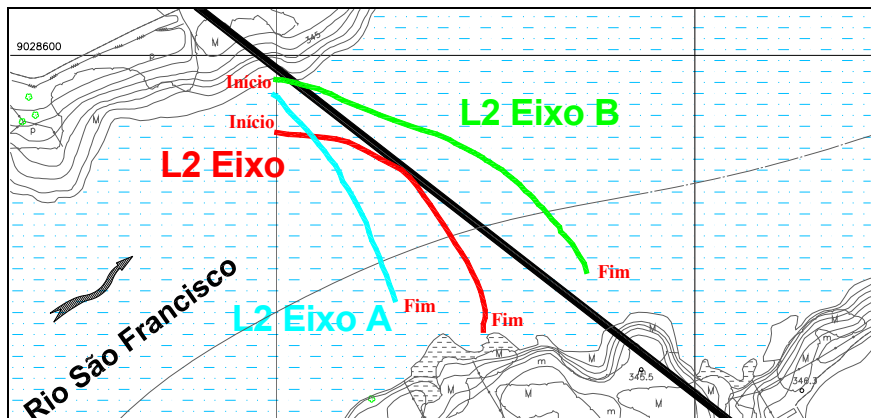


FIGURA 6.3-3 – Trajetória navegada nas três travessias ortogonais ao fluxo do rio. Ocorrências de derivas do cabo multieletrodo.

A solução adotada para a deriva do cabo foi de se executar linhas navegando contra a correnteza, em direção través ao eixo original e em menor ângulo possível, além da execução de várias seções paralelas ao eixo previsto e, também, navegadas contra a correnteza. Mesmo assim, ocorreram situações de inflexão do alinhamento dos eixos navegados, porém em condições desprezíveis. A FIGURA 6.3-4 apresenta uma visão parcial do problema de deriva do cabo já nos primeiros metros navegados ao longo do eixo.



(a)



(b)

FIGURA 6.3-4 – (a) Local de travessia do eixo previsto e a deriva do cabo multieletrodo na correnteza do rio. (b) Solução para a deriva com execução de seções paralelas às margens do rio e navegação contra a correnteza.

7. LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Os trabalhos de aquisição dos dados de campo foram realizados entre os dias 13 a 17 de agosto de 2007, onde foram executadas seções de imageamento geoeletrico nos eixos pré-selecionados pela equipe de projeto do aproveitamento, conforme já apresentado na FIGURA 7-2 (Planta de Localização). A Tabela 7-1 apresenta as coordenadas UTM dos pontos iniciais e finais dos eixos previstos.

Tabela 7-1 – Coordenadas de Locação dos Eixos previstos do AHE Riacho Seco.

Designação	Coordenadas		Coordenadas		Extensão Prevista (m)
	N(Y)	E(X)	N(Y)	E(X)	
RS.EnMd	9.028.174	425.146	9.028.591	424.977	450
RS.ExBd	9.028.281	425.615	9.028.749	425.326	550
RS.EnJd	9.028.814	426.134	9.029.075	425.706	500
Rs.EnMe	9.029.289	424.573	9.029.512	424.126	500
RS.EnJe	9.029.455	424.600	9.029.664	424.201	450
Total Previsto (m)					2.450

Onde:

Rs = Riacho Seco; ExB= Eixo do Barramento; EnM = Ensecadeira Montante; EnJ= Ensecadeira Jusante;

d= Direita; e = Esquerda.

Neste contexto, foram realizadas três seções de imageamento ao longo de cada eixo previsto. Este procedimento possibilitou o fornecimento de informações da subsuperfície não só nas posições próximas ao eixo previsto como também o mapeamento de área no entorno do eixo, a montante e jusante. Paralelamente, este procedimento possibilitou a verificação da consistência dos dados adquiridos, uma vez que foi possível a comparação entre cada perfil de seção paralelo.

Executou-se, também seções ao longo do rio (seções de imageamento geoeletrico longitudinais). Estas seções foram executadas em linhas de navegação ao longo do rio, relativamente paralelas entre si, onde foi possível cobrir praticamente toda a travessia, mas com informações da subsuperfície tanto a montante como a jusante da posição dos eixos previstos. As extensões destas seções longitudinais variaram de seção para seção, mas praticamente todas foram maiores que 500 metros. No total, foram executadas 31

seções de imageamento geolétrico. A Tabela 7-2 apresenta todas estas seções executadas nos trabalhos, suas identificações, coordenadas UTM de início e fim, e extensões percorridas na superfície da água. Todas as bases de coordenadas coletadas, utilizadas e aqui apresentadas estão referenciadas ao **DATUM SAD 69**.

Tabela 7-2 - Seções de Imageamento Geolétrico executadas nos estudos do AHE Riacho Seco – PE/BA

ESTRUTURA DO PROJETO	SEÇÃO DE IMAGEAMENTO GEOELÉTRICO	COORDENADA INÍCIO		COORDENADA FIM		Extensão (m)
		Norte	Leste	Norte	Leste	
Eixo 1 Ensecadeira Montante Direita	L1 Eixo	9028467	425006	9028247	425144	262
	L1 Eixo A	9028505	425024	9028295	425109	246
	L1 Eixo B	9028468	425022	9028248	425156	282
Eixo 2 Eixo do Barramento	L2 Eixo	9028564	425199	9028471	425299	152
	L2 Eixo A	9028582	425198	9028486	425257	128
	L2 Eixo B	9028589	425199	9028499	425348	193
Eixo 3 Ensecadeira Jusante Direita	L3 Eixo	9029047	425881	9028773	425925	278
	L3 Eixo A	9029055	425840	9028927	426015	158
	L3 Eixo B	9029017	425866	9028835	425973	248
Eixo 4 Ensecadeira Montante Esquerda	L4 Eixo	9029413	424325	9029334	424404	33
	L4 Eixo A	9029410	424332	9029374	424427	90
	L4 Eixo B	9029391	424342	9029354	424420	97
Eixo 5 Ensecadeira Jusante Esquerda	L5 Eixo	9029577	424396	9029535	424497	128
	L5 Eixo A	9029559	424383	9029533	424496	130
	L5 Eixo B	9029575	424356	9029522	424447	106
Eixos 1 e 2 Seções Transversais	L A	9028491	425019	9028682	425488	525
	L B	9028367	424842	9028647	425348	595
	L C	9028438	424984	9028708	425566	656
	L D	9028479	425090	9028616	425490	438
	L E	9028342	424917	9028605	425432	595
	L F	9028445	425106	9028613	425631	577
	L G	9028292	424938	9028509	425448	570
	L H	9028252	424893	9028483	425331	600
Eixo 3 Seções Transversais	L3 A	9028848	425674	9029390	425940	623
	L 3_B	9028888	425822	9029362	426056	542
	L3 C	9028753	425884	9029294	426141	616
	L3 D	9028793	425921	9029307	426157	584
Eixos 4 e 5 Seções Transversais	L4/5 A	9029269	424220	9029586	424325	349
	L4/5 B	9029284	424280	9029799	424533	600
	L4/5 C	9029199	424228	9029671	424515	570
	L4/5 D	9029265	424352	9030016	424732	863
				Total :	11.834 metros	

8. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Como citado no item 6, os levantamentos de campo consistiram na aquisição simultânea das resistividades elétricas, espessuras da coluna d'água e respectivas coordenadas. A integração destas informações possibilitou a compilação dos *perfis* da subsuperfície do leito do rio São Francisco. Todas as coordenadas dos perfis foram adquiridas durante as trajetórias navegadas. Estes dados permitiram compilar também as *Plantas de Localização das Seções de Imageamento Geoelétrico* que apresentam, além dos eixos navegados, uma base topográfica georeferenciada da região (malha UTM), os limites das margens do rio São Francisco e todas as seções levantadas. Vale lembrar que todo o levantamento foi direcionado por equipamento GPS de navegação referenciado ao **DATUM SAD 69**. Desta forma, é de se esperar que pequenas imprecisões nas posições geográficas das seções tenham ocorrido. As plantas são apresentadas no **Anexo 1** e organizadas da seguinte forma:

Anexo 1 - PLANTAS DE LOCALIZAÇÃO

DESENHO 1 – Planta de Localização dos Eixos do AHE Riacho Seco

DESENHO 2 – Planta de Detalhe dos Eixos 1, 2 e 3 do AHE Riacho Seco

DESENHO 3 – Planta de Detalhe dos Eixos 4 e 5 do AHE Riacho Seco

Todos os perfis passaram pelos processos de inversão 2D e as imagens resultantes foram interpretadas. Os resultados foram compilados nas seções de imageamento geoelétrico. Estes documentos apresentam os intervalos de resistividades elétricas associados a uma escala cromática, as principais feições geoelétricas observadas, assinaladas e interpretadas conforme a legenda apresentada nas seções, além das indicações das coordenadas de início e fim. Entre estas feições geoelétricas assinaladas foram destacados os trechos de anomalias de baixos valores das resistividades que ocorreram logo abaixo do leito do rio, bem como anomalias geoelétricas com características subverticalizadas. Tais documentos são apresentados no **ANEXO 2** da seguinte forma:

ANEXO 2 - SEÇÕES DE IMAGEAMENTO GEOELÉTRICO SUBAQUÁTICO

DESENHO 4 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 1 - EnMd

DESENHO 5 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 2 - ExBd

DESENHO 6 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 3 - EnJd

DESENHO 7 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 4 - EnMe

DESENHO 8 – Seções de Imageamento Geométrico – Eixo 5 - EnJe

DESENHO 9/A – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LA, LB, LC

DESENHO 9/B – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LD, LE

DESENHO 9/C – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LF, LG, LH

DESENHO 10 – Seções Transversais ao Eixo3 – Seções L3A, L3B, L3C e L3D

DESENHO 11 – Seções Transversais aos Eixos 4 e 5 – Seções L4/5A, L4/5B, L4/5C e L4/5D

A fim de permitir uma visualização global dos locais de ocorrência das anomalias geofísicas mapeadas também foram compiladas as Plantas Síntese (**Anexo 3**), as quais apresentam a localização das seções em planta com as posições das principais anomalias, identificadas nas seções, projetadas à superfície. O **Anexo 3** está organizado da seguinte forma:

Anexo 3 - PLANTAS SÍNTESE

DESENHO 12 – Planta Síntese das Informações Geofísicas – Eixos 1, 2 e 3

DESENHO 13 - Planta Síntese das Informações Geofísicas – Eixos 4 e 5

Mesmo com os devidos cuidados, os dados de batimetria, dado o grande volume coletado, e também devido à ocorrência de trechos com grande severidade topográfica, apresentaram variações significativas entre leituras consecutivas. Este fato fez com que fosse necessária a aplicação de um processo de filtragem dos dados para suavizar os efeitos de ruídos e definir o contorno do leito. Os resultados foram compilados nas seções batimétricas. Estes documentos constam no **Anexo 4** e apresentam as distâncias percorridas na superfície da água (progressivas) e as respectivas espessuras da lâmina d'água.

Em todas as seções a superfície da água do rio foi considerada como **profundidade zero**. As espessuras da lâmina d'água, bem como das profundidades do imageamento geométrico foram referenciadas a este nível zero e obedecem a uma escala de profundidades com valores negativos para representar distâncias abaixo da superfície da água.

Na ocasião dos trabalhos de campo (15/08/07) foi efetuada uma leitura da cota do nível do rio por meio de réguas topográficas instaladas na margem direita do rio. Esta cota foi de 307,8 metros. Portanto, nas seções, a profundidade zero corresponde à cota topográfica 307,8 metros, mas como este seria um valor não exato, nas seções preferiu-se manter a referência na profundidade zero.

9. CONSIDERAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS

9.1 Sobre as dificuldades dos processamentos com alta densidade de dados

Os trabalhos de processamento dos dados foram iniciados logo após o término dos levantamentos de campo. O volume de dados adquiridos durante a campanha foi considerável, tanto de leituras de resistividades elétricas como de batimetria e coordenadas geodésicas. Para se ter uma noção da quantidade envolvida, nos quase 12 km lineares de perfis estudados, foram coletados mais de 50.000 pontos de resistividades elétricas aparentes e mais de 5.000 pontos de medidas da espessura da lâmina d'água e coordenadas fornecidas pelo GPS.

Com este montante de material a ser trabalhado, o primeiro passo foi organizar os posicionamentos de todas as seções executadas em planta (base de coordenadas UTM). Estas informações forneceram a base para a compilação das plantas de localizações referenciadas aos locais que foram navegados.

O segundo passo foi a verificação das batimetrias coletadas, uma vez que a batimetria por eco-sonar sempre apresenta certo nível de ruído ao sinal captado, mesmo com uso de duplo feixe e sinais de mais altas frequências. Desta forma, para suavizar o efeito destas oscilações nos dados obtidos, aplicou-se a filtragem que, basicamente, foi um filtro passa-baixas. Com dados ruidosos semelhantes, Guitton & Claerbout (2004) analisaram os efeitos, as causas diretas e, para atenuar os efeitos, desenvolveram programas computacionais para a aplicação de filtros aos dados batimétrico. De fato, não é demasiadamente complexa a compilação de programas em linguagem computacionais conhecidas, como MatLab, compiladores Pascal, C++ ou similares, para aplicação de filtros lineares adequados aos dados coletados. Também há opções de softwares disponíveis no mercado, específicos para estes fins.

Neste trabalho foi utilizado software específico para tratamentos de dados geofísicos, disponível no mercado, com opções de diversos tipos de filtros harmônicos conhecidos. Dentre estes, ressalta-se o filtro utilizado, FFT (Transformada Rápida de Fourier), com grande eficácia e rapidez ao ser aplicado a dados com características de ruídos harmônicos não-Gaussianos.

Devido à quantidade de dados, estes processos requereram tempo e capacidade de processamento considerável em computador convencional, plataforma Pentium IV. Como resultados, foram obtidas as planilhas para cada seção navegada, gerando informações com distâncias interpoladas a cada metro após o processo de filtragem, o

que permitiu a construção de gráficos dos *Perfis Batimétricos* para visualização, controle de qualidade do resultado e posterior utilização para definição do contorno da topografia do fundo do rio, tal qual apresentado no item 2.6. Todas estas seções também estão apresentadas no anexo 4.

9.2 Integração das informações

Finalizadas as etapas de processamento, procedeu-se à integração de todos os dados coletados (coordenadas, batimetria e resistividade elétrica aparente) para a construção das pseudo-seções. As pseudo-seções foram construídas e processadas como citado no item 2.3 para corrigir as distorções inerentes ao arranjo fazendo-se uso do software RES2DINV (Loke, 1996, Griffiths, 1993), mas com as seguintes vantagens e informações adicionais: grande densidade de pontos; informação da topografia do fundo do rio ao longo da seção e conseqüente determinação da espessura da coluna d'água; conhecimento do valor da resistividade elétrica da água para posterior correção da distorção que esta camada imprime aos dados.

Os resultados são as seções de imageamento geoeletrico que, como citado, apresentam as melhores imagens das distribuições das resistividades elétricas reais, o contorno da superfície topográfica, bem como as espessuras da lâmina d'água.

Todas as seções foram compiladas com base em uma única escala de cores associadas aos valores das resistividades elétricas obtidas pelos processos de inversão 2D. Este procedimento visou uma melhor compreensão dos resultados e principalmente para facilitar a comparação entre todas as seções levantadas. A escala cromática utilizada, e apresentada em todos os desenhos, variou de 25 a 2.000 Ohm.m. A FIGURA 9.2-1 apresenta as cores escolhidas e indicações dos valores das resistividades elétricas adotados. A Figura 9.2-2 apresenta um exemplo de seção de imageamento geoeletrico obtida nos levantamentos com a determinação da superfície do fundo do rio e as distribuições das resistividades elétricas associadas a escala de cores determinada.



FIGURA 9.2-1 - Escala cromática das resistividades elétricas utilizadas nas seções de imageamento (valores em Ohm.m).

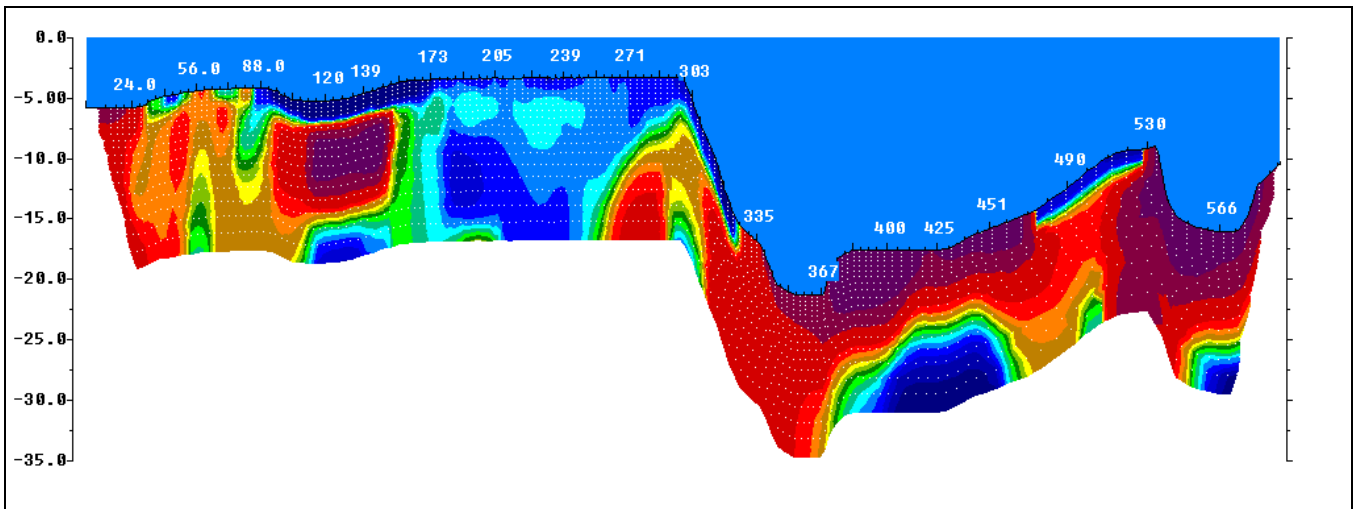


FIGURA 9.2-2 – Exemplo de seção de imageamento geolétrico obtida nos levantamentos de campo.

Em uma análise prévia de todas as figuras, o que mais chamou a atenção foram as grandes variações da topografia do fundo do rio assim como dos valores das resistividades elétricas evidenciadas nas seções. O que se observou é que, dependendo do local onde a seção foi executada, parece ocorrer um domínio de valores das resistividades elétricas. Por exemplo, as seções do Eixo 1 (Ensecadeira Montante Direita) apresentaram domínio dos mais baixos valores das resistividades elétricas. Já nos demais eixos, os valores foram os mais altos, excetuando o eixo 5 que apresentou ocorrências de trechos de altos valores e trechos de valores intermediários a baixos (Anexo 2, DESENHOS 4 a 11).

O objetivo principal dos levantamentos foi de fornecer informações sobre ocorrências de camadas de sedimentos e/ou rochas alteradas/fraturadas no fundo do rio. Com isso em mente, foram analisadas, em todas as seções, anomalias nos valores que fossem associáveis às ocorrências destas situações. O que se procurou foram valores baixíssimos das resistividades já nos primeiros níveis, logo abaixo do fundo topográfico do rio. A justificativa é: se considerarmos um fundo de rio todo rochoso e de baixa porosidade (rochas cristalinas Pré-Cambrianas) os valores esperados das resistividades seriam os mais altos possíveis. Se ocorressem camadas de sedimentos sobrepostos (Depósitos Terciários/Quaternários argilo-arenosos) ou mesmo rochas fraturadas e alteradas, estas estariam saturadas em água e, certamente, alterariam para baixo os valores das resistividades elétricas.

Neste contexto, foi possível demarcar em grande parte das seções trechos de anomalias dos mais baixos valores das resistividades elétricas ocorrendo nas porções superficiais da subsuperfície do leito do rio, com formatos alongados na horizontal e pouco desenvolvidos na vertical. Os trechos de ocorrência destas anomalias foram demarcados nas seções através de hachuras em amarelo, seus limites inferiores delimitados por uma linha contínua na cor preta (uma primeira estimativa das espessuras das camadas) e suas extensões foram projetadas à superfície (retângulo marrom - ver Desenhos 4 a 11). Elas foram aqui associadas às prováveis ocorrências de camadas de sedimentos e/ou rochas alteradas e fraturadas.

Além destas anomalias, as seções de imageamento geoeletrico também evidenciaram grandes contrastes laterais nos valores das resistividades (Contato entre unidades geoeletricas distintas) obtidos no interior da subsuperfície do rio, bem como anomalias de extensão limitada horizontalmente e com continuidade em profundidade (indícios de possíveis zonas estruturadas no interior do maciço rochoso). Todas estas anomalias que foram identificadas estão demarcadas nas seções, suas posições indicadas e projetadas à superfície.

As simbologias e respectivas associações e interpretações que constam nas legendas dos desenhos também estão apresentadas na FIGURA 9.2-3.

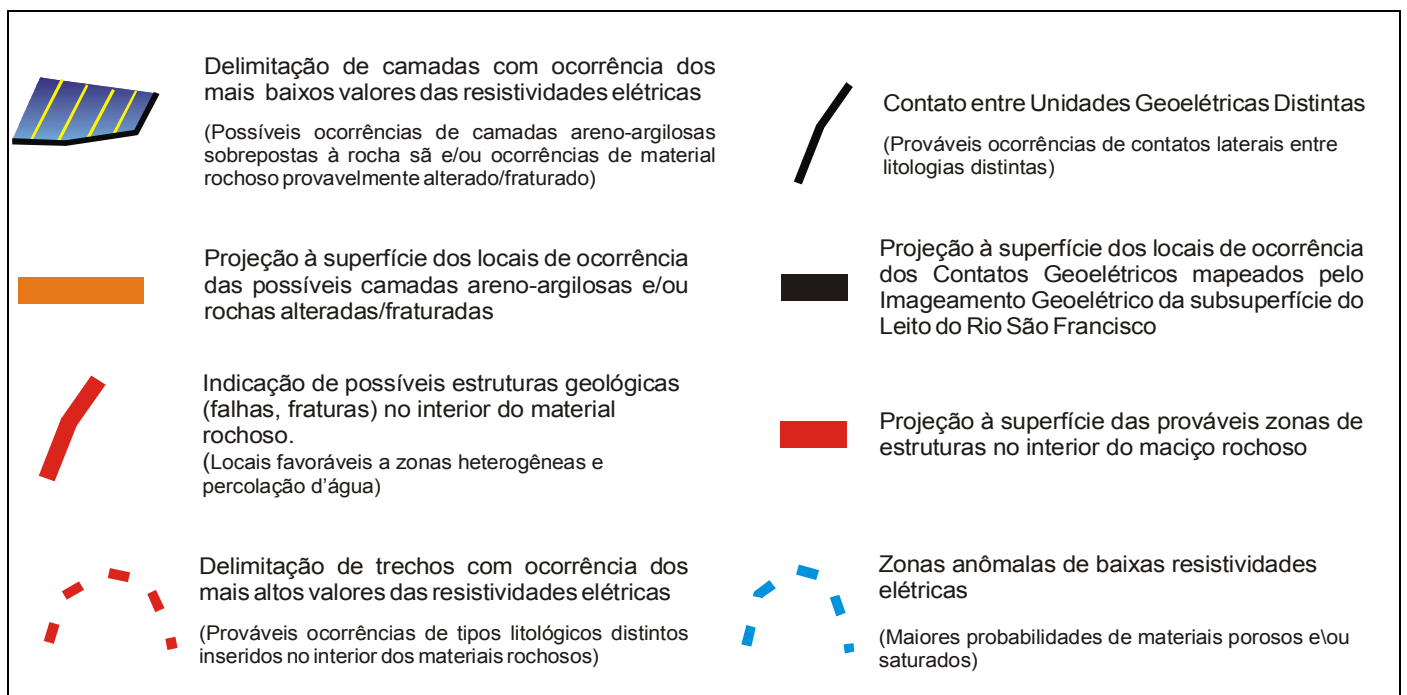


FIGURA 9.2-3 - Legenda apresentada nos desenhos das Seções de Imageamento Geoeletrico com indicação das anomalias geofísicas demarcadas nas seções e as interpretações inferidas.

Com o objetivo de sintetizar as informações obtidas em todas as seções executadas nos levantamentos (eixos e longitudinais), foram compilados os desenhos 12 e 13 (Anexo 3 - plantas síntese das informações geométricas). Estes documentos apresentam as localizações das seções bem como as anomalias projetadas à superfície. Isto possibilitou a visualização do comportamento das principais feições mapeadas pela técnica geofísica e possíveis associações laterais entre linhas, ou seja, consistência das imagens geométricas obtidas.

10. CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou testar a aplicação do método de eletrorresistividade com sistema multieletrodo em ambiente subaquático. Em adição, foi verificada sua eficácia na identificação de eventuais ocorrências de camadas de sedimentos e também fornecer informações da subsuperfície do fundo do rio sobre possíveis contatos geológicos e zonas estruturadas, como alterações e/ou falhamentos no interior do maciço rochoso.

Os estudos foram executados nos locais previstos para implantação de barragem do projeto do Aproveitamento Hidro Elétrico Riacho Seco. Neste contexto, foram executadas no total 31 seções de imageamento geoeletrico distribuídas ao longo dos eixos previstos, cortando o rio, bem como longitudinais, concorrentes ao fluxo do rio. No total, foram executados 11.834m lineares de seções de imageamento geoeletrico subaquático distribuídos nas áreas dos cinco eixos previstos.

A aquisição dos dados através do equipamento multieletrodo e integrado a GPS e eco-batímetro permitiu que o levantamento fosse realizado utilizando embarcação para arrastar, na superfície da água, o cabo multicondutor, recobrando as áreas em várias seções. Utilizou-se cabo multieletrodo com utilização do arranjo dipolo-dipolo e espaçamento entre *takeouts* de 5 metros. Graças aos 13 canais disponíveis no equipamento, foi possível investigar dez níveis de profundidades. A maior vantagem deste tipo de aquisição foi detalhar a topografia do fundo do rio São Francisco e investigar camadas mais profundas da subsuperfície, a até 15 metros abaixo da superfície do fundo. Em adição, foi possível cobrir uma área bastante extensa rapidamente e com grande densidade de informações, ou seja, a produtividade no levantamento de campo mostrou ser muito superior à da eletrorresistividade terrestre.

Em contrapartida, a aquisição em grande escala e com alta densidade de pontos coletados por área envolveu um grande tempo de verificação e processamento dos dados, particularmente em relação aos dados batimétricos, que exigiram aplicação de filtragem para suavização dos contornos obtidos.

O processo de inversão, normalmente rápido em microcomputadores convencionais, também demandou grande quantidade de tempo, em especial às linhas com extensões superiores a 400 metros uma vez que nestes casos a quantidade de dados superava os 2.000 pontos. Também se ressalta a grande dificuldade encontrada para a coleta dos dados em travessias ortogonais ao fluxo do rio, com uso de cabo

multieletrodo arrastado por embarcação, uma vez que ocorreram derivas nas direções navegadas e, mesmo, a necessidade de utilizar bóias para garantir a flutuação do cabo já que caso ele afundasse poderiam ocorrer enroscos no fundo do rio que poderiam danificá-lo.

Os resultados finais se mostraram bastante satisfatórios, coerentes, pois foi possível observar continuidades das feições geométricas, entre linhas próximas, e possibilitaram a visualização de diversas anomalias geométricas, tanto superficiais, que foram associadas às ocorrências das prováveis camadas de sedimentos e/ou rochas alteradas/fraturadas, como mais profundas, onde foi possível visualizar anomalias no interior dos materiais rochosos da subsuperfície do leito. Estas foram associadas a possíveis contatos litológicos ou trechos com fortes indicações de prováveis ocorrências de zonas estruturadas, ou seja, locais mais favoráveis às ocorrências de materiais heterogêneos e à percolação de água subterrânea. Infelizmente não se dispõe, ainda, de dados diretos para confirmação das interpretações apresentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRAGA, A. C. O. *Métodos Geométricos Aplicados na Caracterização Geológica e Geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí no Município de Rio Claro – São Paulo*. 1997. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Minas e Metalurgia. *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folha Aracajú (SC. 24)*. Brasília: DPRM, 2004. 1 mapa, color., Escala 1:1.000.000.
- COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. *Rio São Francisco - "Degrau" Sobradinho-Itaparica, Aproveitamentos Hidrelétricos e Outros Benefícios Econômicos e Sociais*. Síntese dos Estudos, Recife, PE, 1999.
- DOBRIN, M.B.; SAVIT, C, H. *Introduction to Geophysical Prospecting*. International Student Edition. Singapore: McGraw –Hill, 1981. 630p.
- Edwards, L. S. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, v. 42, n.5, p. 1020-1036. 1977.
- GALLAS, J. D. F. *Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental*. Rio Claro, São Paulo. 2000. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- GANDOLFO, O. C. B. *Um Estudo do Imageamento Geométrico na Investigação Rasa*. São Paulo, SP. 2007. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GRIFFITHS, D.H.; BARKER, R.D. Two-Dimensional Resistivity Imaging and Modelling in Areas of Complex Geology. *Journal of Applied Geophysics*, v.29, p. 211-226, 1993.

- GUITTON, A.; CLAERBOUT, J. Interpolation of Bathymetry Data Set of Galilee: A noise attenuation Problem. *Geophysics*, v69, p. 608-616, 2004.
- LOKE, M.H.; BARKER, R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo section by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, v44, p. 131-152, 1996.
- ORELLANA, E.S. *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo, 1972. 523p.
- PARASNIS, D.S. *Principles of Applied Geophysics*. 4ed. New York: Chapman and Hall, 1986. 402 p.
- ROBINSON, E.S.; ÇORUH, C. *Basic Exploration Geophysics*. New York: John Wiley & Sons, 1996. 562p.
- SHARMA, P.V. *Geophysical Methods in Geology*. 2ed. New York: Elsevier Science Publishing Co, 1986. 442 p.
- SOUZA, L.A.P. *Revisão Crítica da Aplicabilidade dos Métodos Geofísicos na Investigação de Áreas Submersas Rasa*. 2006. Tese (Doutorado) - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. *Applied Geophysics*. 2ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990, 770 p.
- YANG, C.; JEAN, L., CHAN, L. *Underwater Profiling by DC Tomography and GPR Methods*. *Institute of Applied Geology*. National Central University, Taiwan, p. 654-656, 2007.

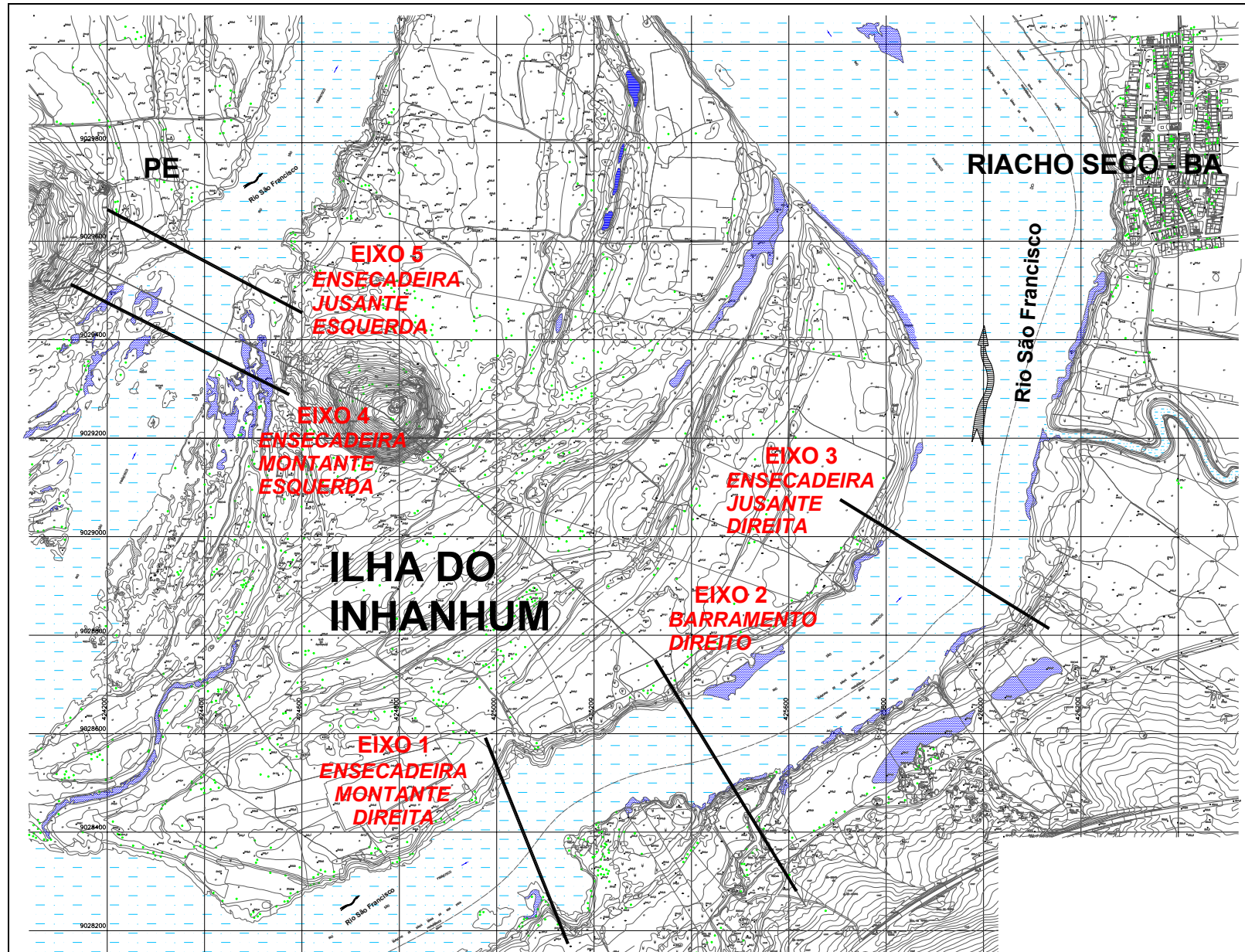
ANEXO 1

PLANTAS DE LOCALIZAÇÃO

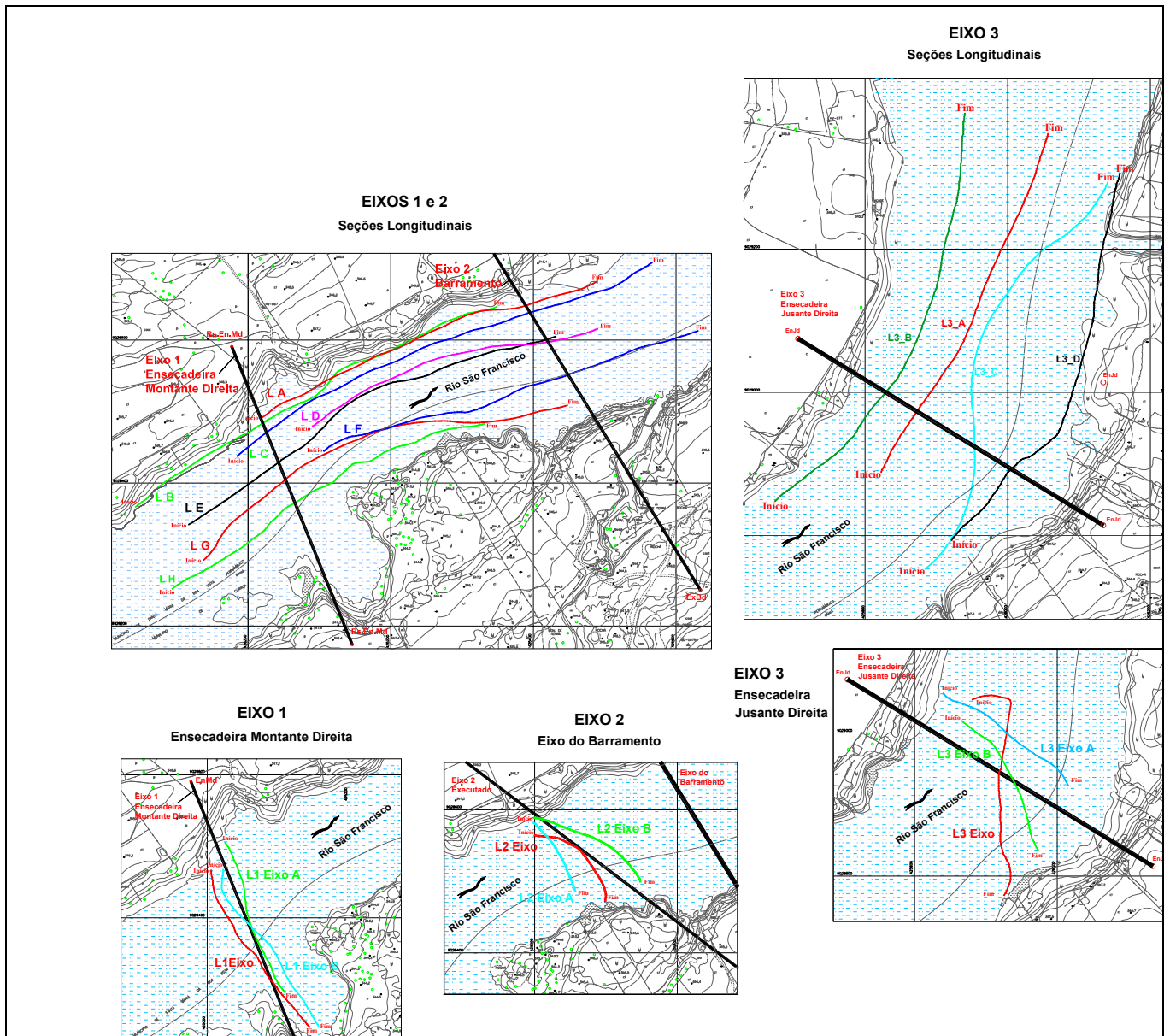
DESENHO 1 – Planta de Localização dos Eixos do AHE Riacho Seco

DESENHO 2 – Planta de Detalhe dos Eixos 1, 2 e 3 do AHE Riacho Seco e linhas de navegação executadas.

DESENHO 3 – Planta de Detalhe dos Eixos 4 e 5 do AHE Riacho Seco e linhas de navegação executadas

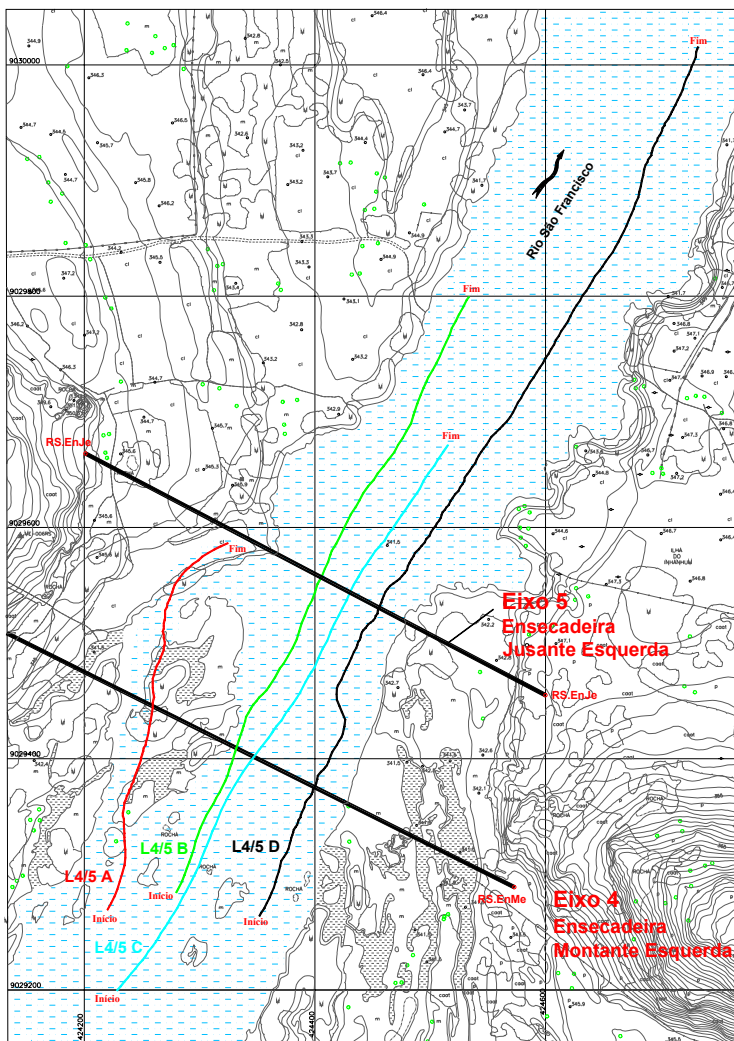


DESENHO 1. Planta de Localização dos Eixos do AHE Riacho Seco e linhas de navegação executadas.

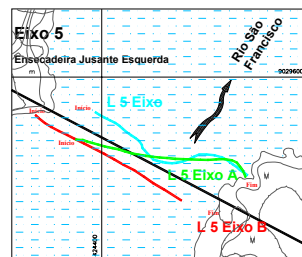


DESENHO 2. Planta de Detalhe dos Eixos 1, 2 e 3 do AHE Riacho Seco e linhas de navegação executadas.

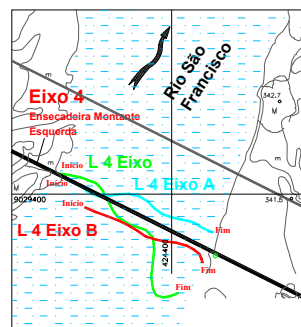
EIXOS 4 e 5
Seções Longitudinais



EIXO 5
Ensecadeira Jusante Esquerda



EIXO 4
Ensecadeira Montante Esquerda



DESENHO 3. Planta de Detalhe dos Eixos 4 e 5 do AHE Riacho Seco e linhas de navegação executadas.

ANEXO 2

SEÇÕES DE IMAGEAMENTO GEOELÉTRICO

DESENHO 4 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 1 – EnMd

DESENHO 5 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 2 – ExBd

DESENHO 6 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 3 – EnJd

DESENHO 7 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 4 – EnMe

DESENHO 8 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 5 – EnJe

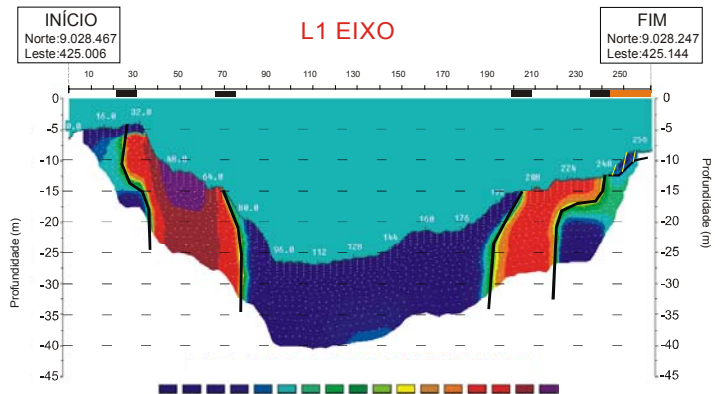
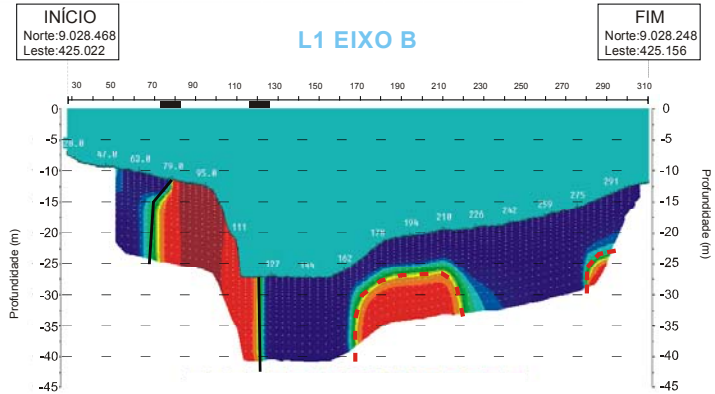
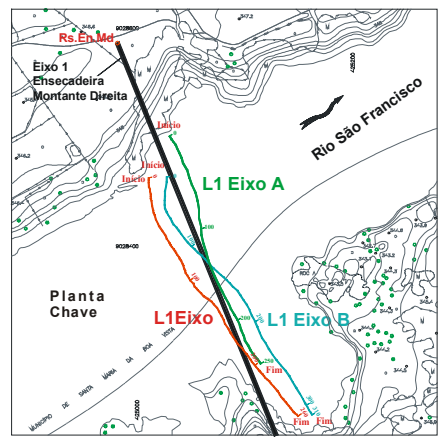
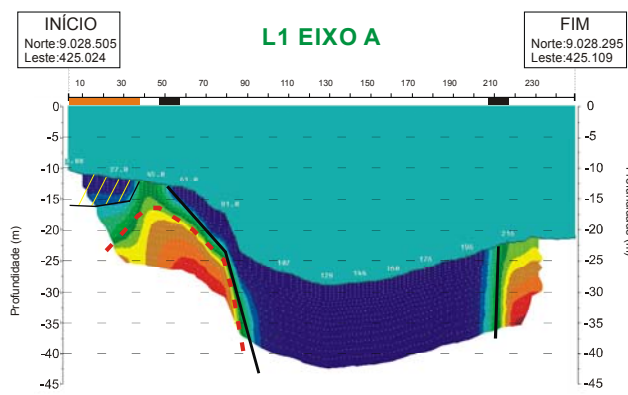
DESENHO 9/A – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LA, LB, LC

DESENHO 9/B – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LD, LE

DESENHO 9/C – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LF, LG, LH

DESENHO 10 – Seções Transversais ao Eixo3 – Seções L3A, L3B, L3C e L3D

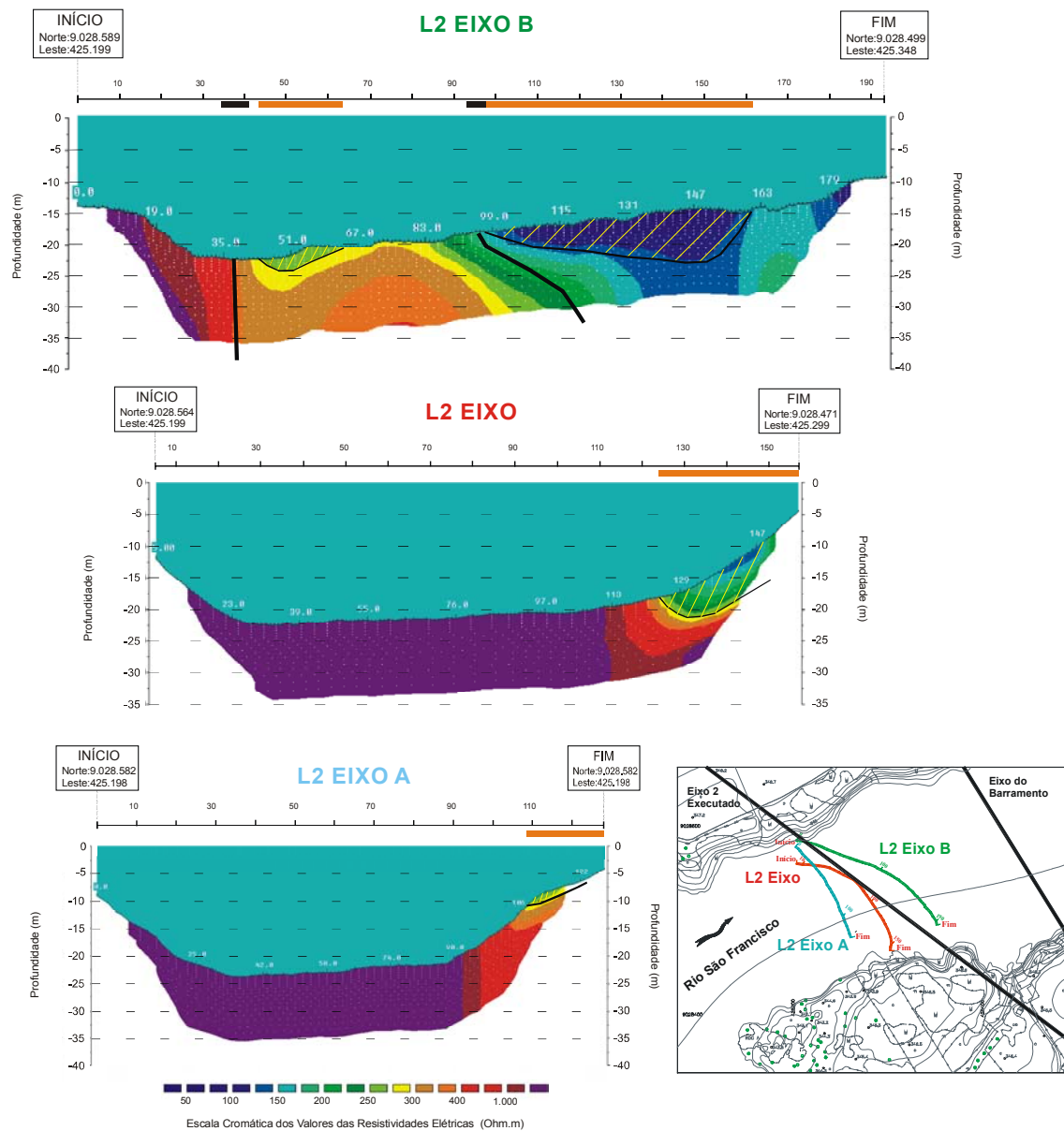
**DESENHO 11 – Seções Transversais aos Eixos 4 e 5 – Seções L4/5A, L4/5B,
L4/5C e L4/5D**



LEGENDA

- Delimitação de camadas com ocorrência dos mais baixos valores das resistividades elétricas (Possíveis ocorrências de camadas areno-argilosas sobrepostas à rocha sã e/ou ocorrências de material rochoso provavelmente alterado/fraturado)
- Projeção à superfície dos locais de ocorrência das possíveis camadas areno-argilosas e/ou rochas alteradas/fraturadas
- Delimitação de trechos com ocorrência dos mais altos valores das resistividades elétricas (Prováveis ocorrências de tipos litológicos distintos inseridos no interior dos materiais rochosos)
- Contato entre Unidades Geoeletricas Distintas (Prováveis ocorrências de contatos laterais entre litologias distintas)
- Projeção à superfície dos locais de ocorrência dos Contatos Geoeletricos mapeados pelo Imageamento Geoeletrico da subsuperfície do Leito do Rio São Francisco
- Indicação das Coordenadas UTM da seção e Distância Progressiva navegada na superfície do rio
- Lâmina D'água
- Superfície Topográfica do Leito do Rio (Profundidades Batimétricas obtidas por Eco-Sonar)
- Imageamento Geoeletrico da Subsuperfície do Leito do Rio

DESENHO 4. Seções de Imageamento Geoeletrico – Eixo 1 – EnMd



LEGENDA



Delimitação de camadas com ocorrência dos mais baixos valores das resistividades elétricas (Possíveis ocorrências de camadas areno-argilosas sobrepostas à rocha sã e/ou ocorrências de material rochoso provavelmente alterado/fraturado)



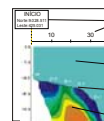
Projeção à superfície dos locais de ocorrência das possíveis camadas areno-argilosas e/ou rochas alteradas/fraturadas



Contato entre Unidades Geolétricas Distintas (Prováveis ocorrências de contatos laterais entre litologias distintas)

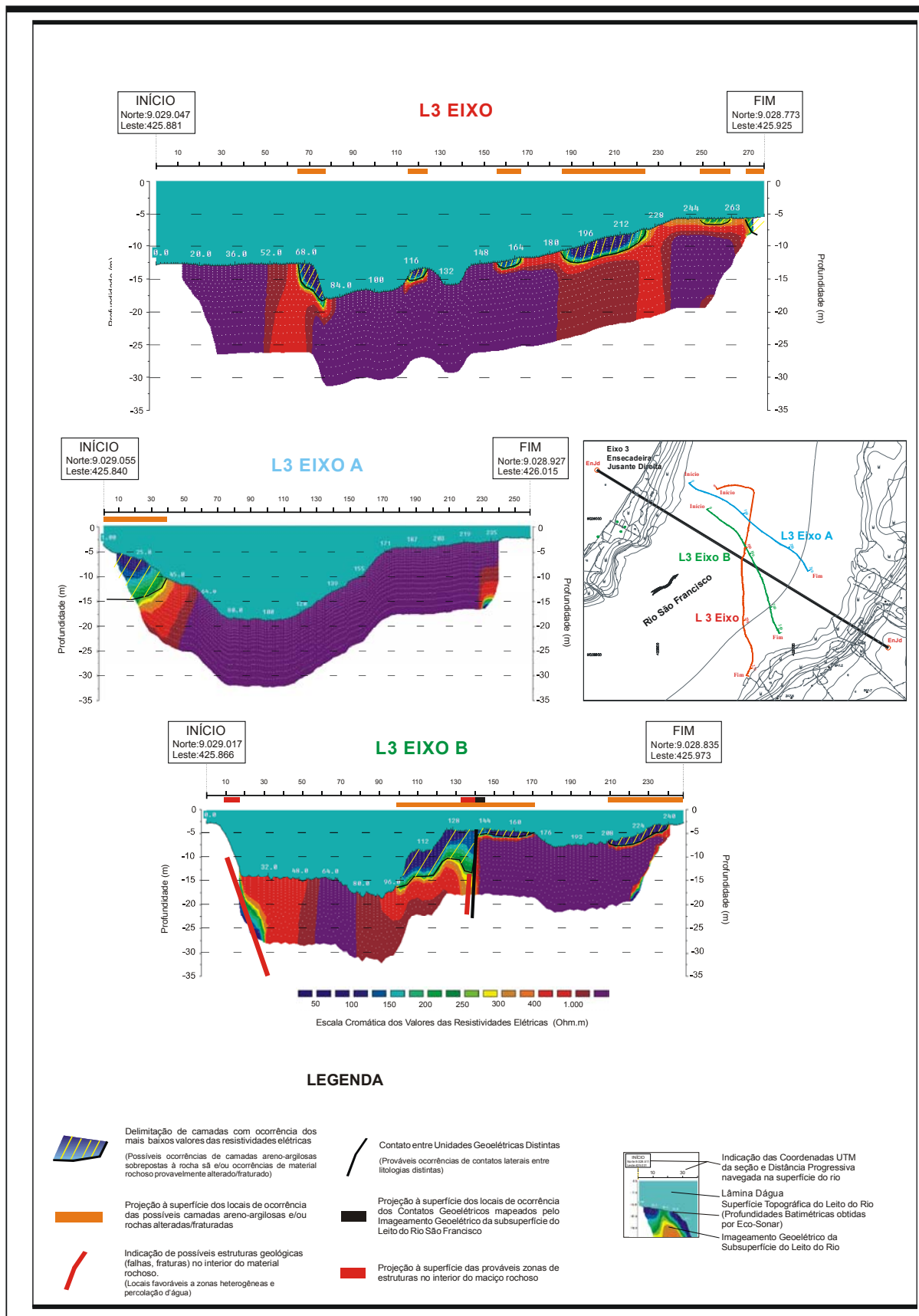


Projeção à superfície dos locais de ocorrência dos Contatos Geolétricos mapeados pelo Imageamento Geolétrico da subsuperfície do Leito do Rio São Francisco

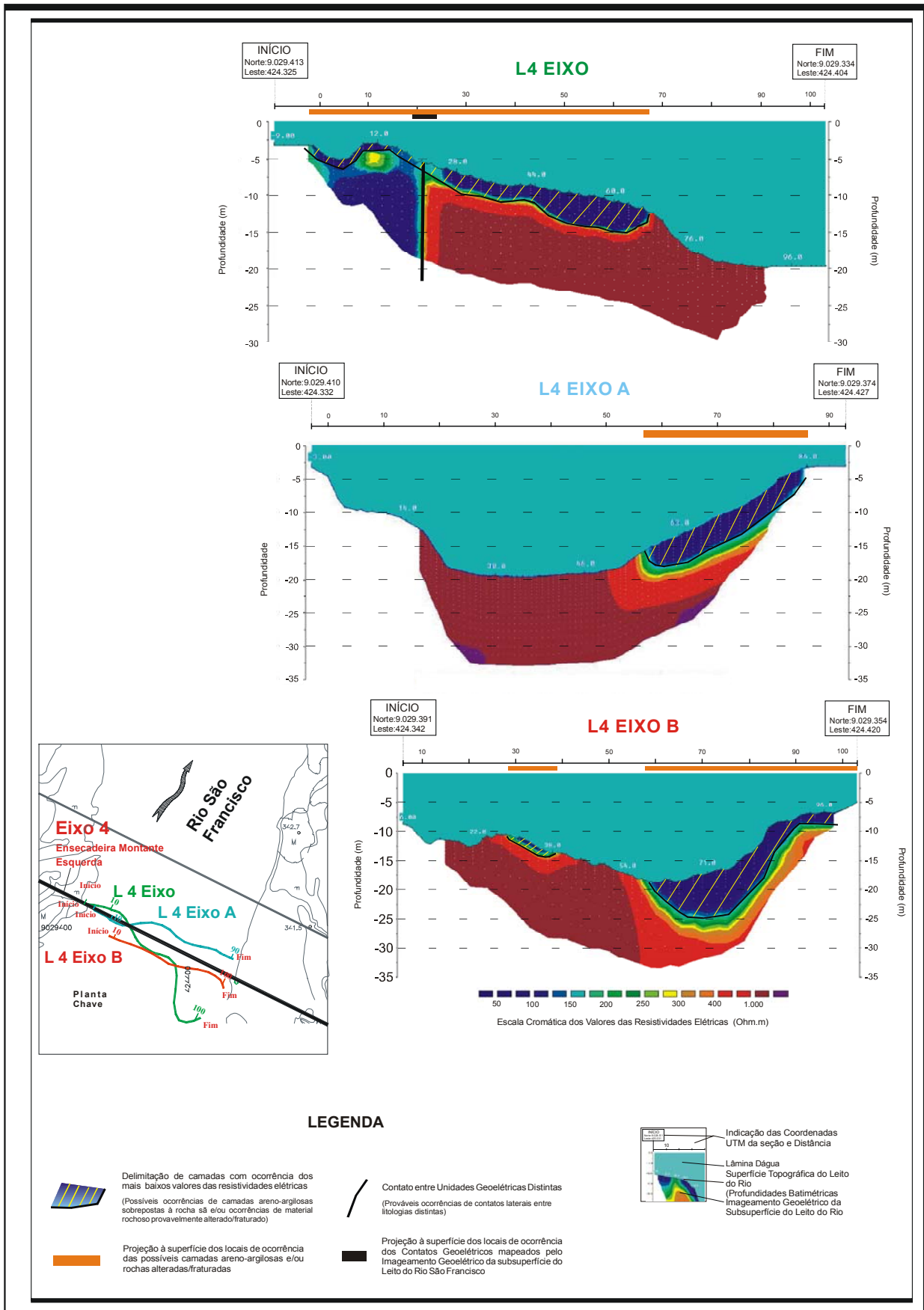


Indicação das Coordenadas UTM da seção e Distância Progressiva navegada na superfície do rio
 Lâmina D'água
 Superfície Topográfica do Leito do Rio (Profundidades Batimétricas obtidas por Eco-Sonar)
 Imageamento Geolétrico da Subsuperfície do Leito do Rio

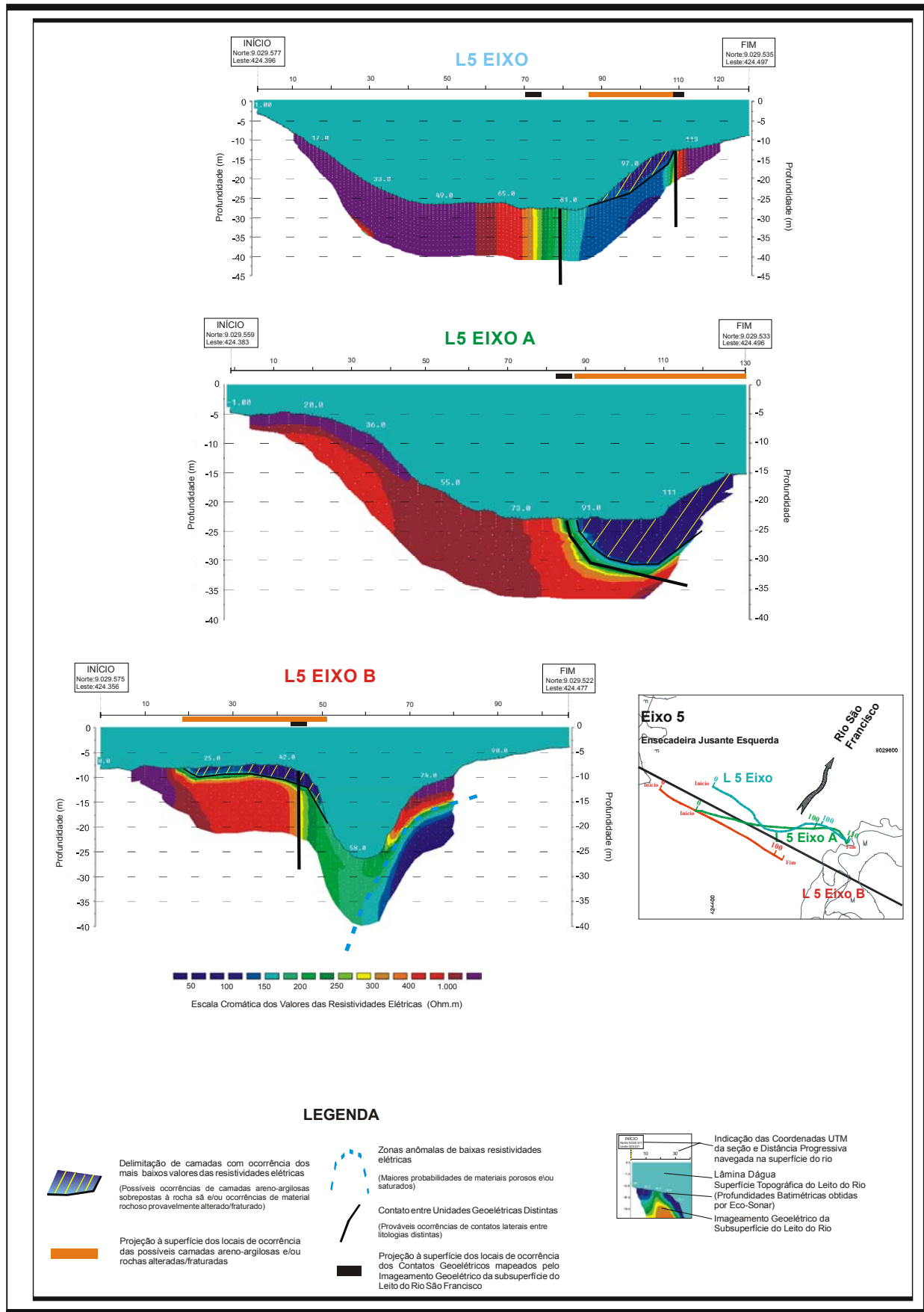
DESENHO 5 – Seções de Imageamento Geolétrico – Eixo 2 – ExBd



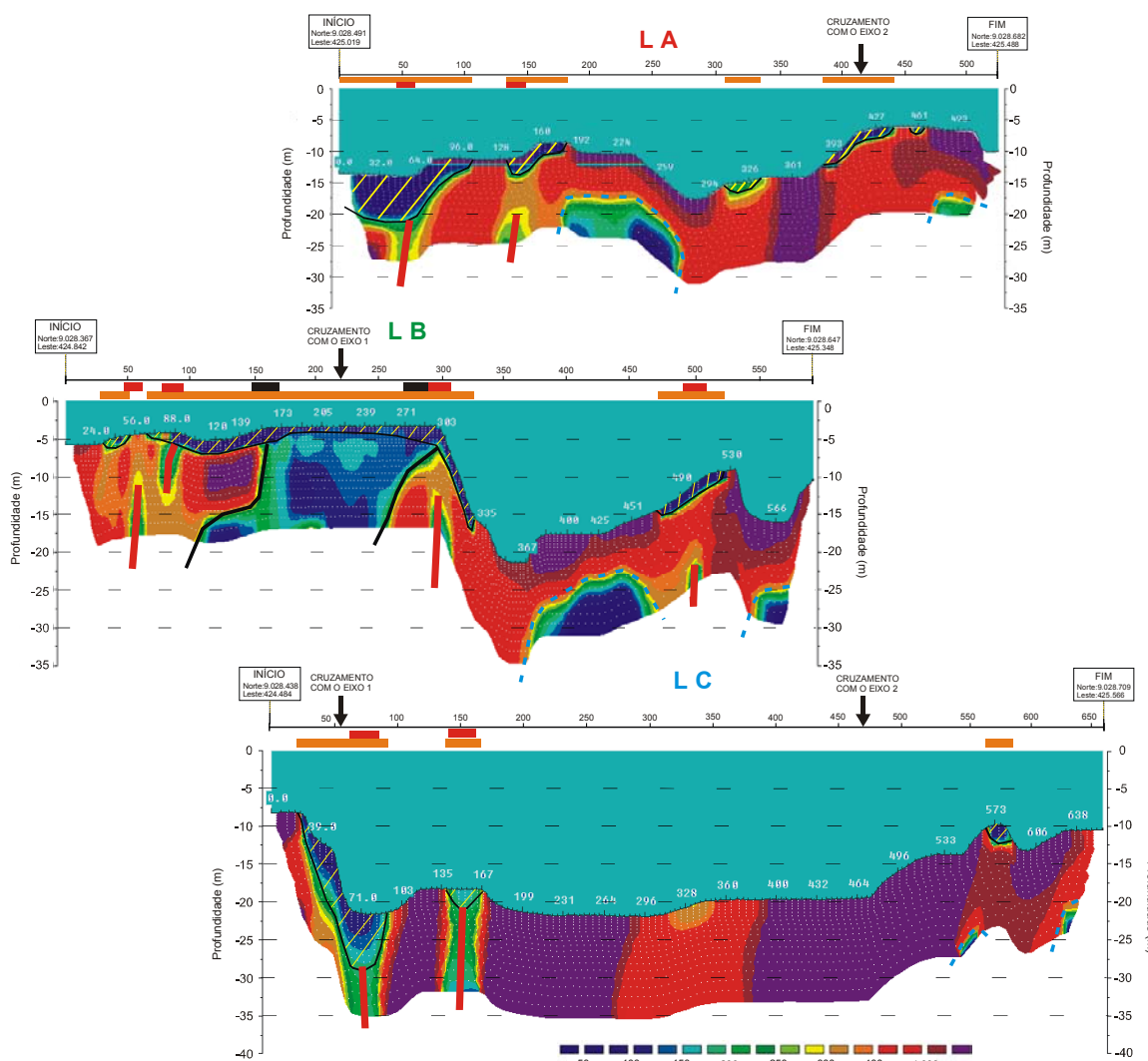
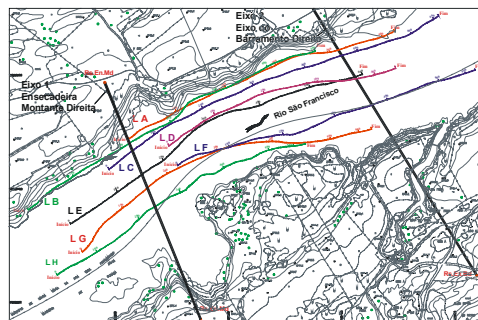
DESENHO 6 – Seções de Imageamento Geoeletrico – Eixo 3 – EnJd



DESENHO 7 – Seções de Imageamento Geométrico – Eixo 4 – EnMe



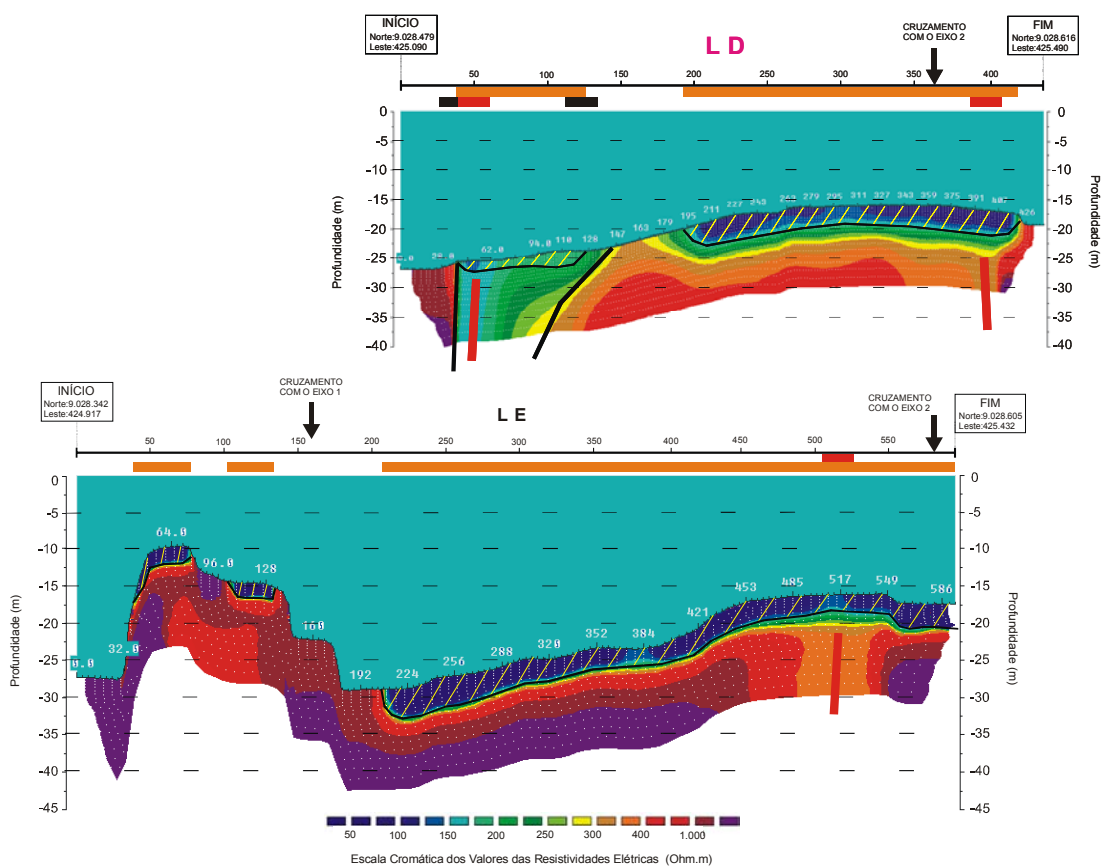
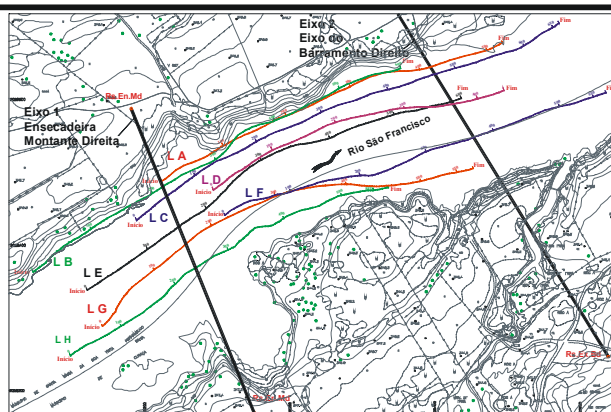
DESENHO 8 – Seções de Imageamento Geoelétrico – Eixo 5 – EnJe



LEGENDA

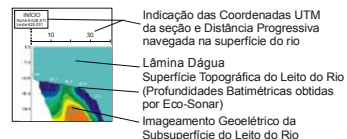
- Delimitação de camadas com ocorrência dos mais baixos valores das resistividades elétricas (Possíveis ocorrências de camadas areno-argilosas sobrepostas à rocha sã e/ou ocorrências de material rochoso provavelmente alterado/fraturado)
- Projeção à superfície dos locais de ocorrência das possíveis camadas areno-argilosas e/ou rochas alteradas/fraturadas
- Zonas anômalas de baixas resistividades elétricas (Maiores probabilidades de materiais porosos e/ou saturados)
- Contato entre Unidades Geotectônicas Distintas (Prováveis ocorrências de contatos laterais entre litologias distintas)
- Indicação de possíveis estruturas geológicas (falhas, fraturas) no interior do material rochoso. (Locais favoráveis a zonas heterogêneas e percolação d'água)
- Projeção à superfície dos locais de ocorrência dos Contatos Geotectônicos mapeados pelo Imageamento Geotectônico da subsuperfície do Leito do Rio São Francisco
- Projeção à superfície das prováveis zonas de estruturas no interior do maciço rochoso
- Indicação das Coordenadas UTM da seção e Distância Progressiva navegada na superfície do rio
- Lâmina d'água
- Superfície Topográfica do Leito do Rio (Profundidades Batimétricas obtidas por Eco-Sonar)
- Imageamento Geotectônico da Subssuperfície do Leito do Rio

DESENHO 9/A – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LA, LB, LC

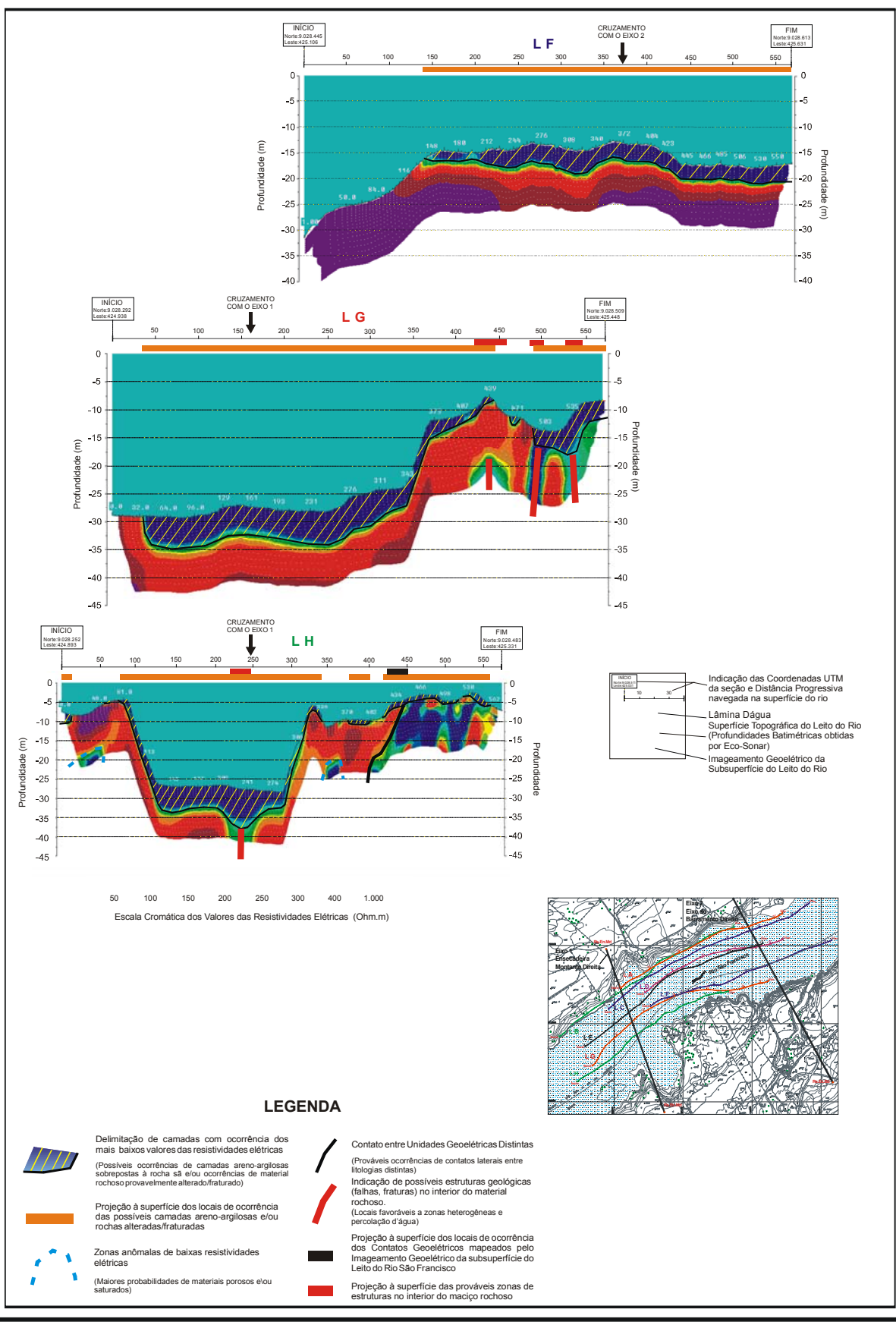


LEGENDA

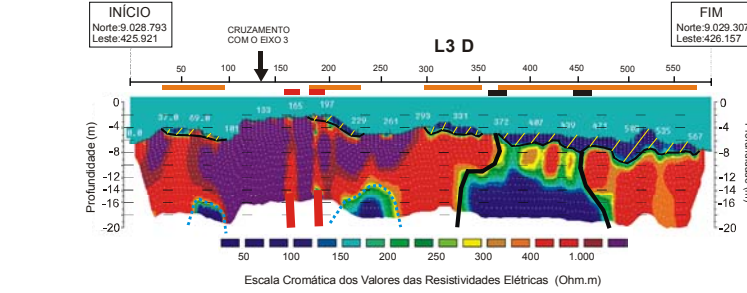
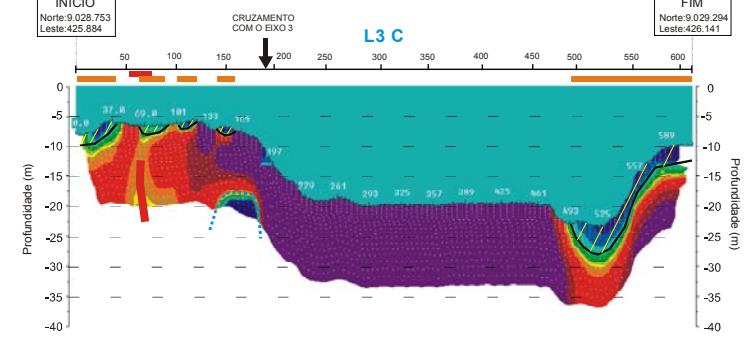
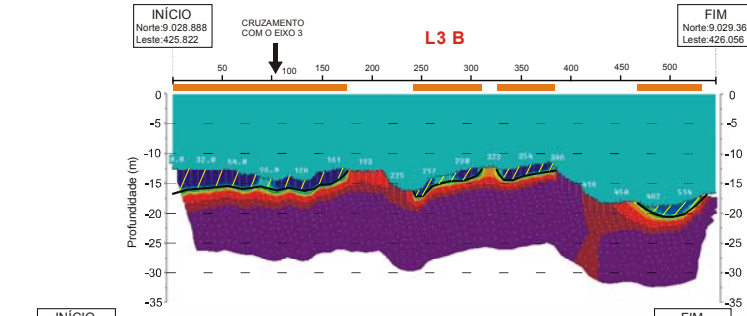
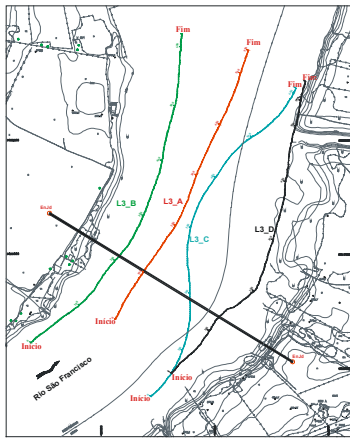
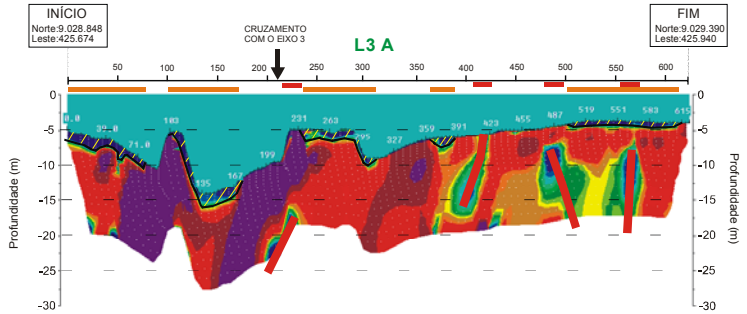
- Delimitação de camadas com ocorrência dos mais baixos valores das resistividades elétricas (Possíveis ocorrências de camadas areno-argilosas sobrepostas à rocha sã e/ou ocorrências de material rochoso provavelmente alterado/fraturado)
- Projeção à superfície dos locais de ocorrência das possíveis camadas areno-argilosas e/ou rochas alteradas/fraturadas
- Delimitação de trechos com ocorrência dos mais altos valores das resistividades elétricas (Prováveis ocorrências de tipos litológicos distintos inseridos no interior dos materiais rochosos)
- Zonas anômalas de baixas resistividades elétricas (Maiores probabilidades de materiais porosos e/ou saturados)
- Contato entre Unidades Geoelétricas Distintas (Prováveis ocorrências de contatos laterais entre litologias distintas)
- Indicação de possíveis estruturas geológicas (falhas, fraturas) no interior do material rochoso (Locais favoráveis a zonas heterogêneas e percolação d'água)
- Projeção à superfície dos locais de ocorrência dos Contatos Geoelétricos mapeados pelo Imageamento Geoelétrico da subsuperfície do Leito do Rio São Francisco
- Projeção à superfície das prováveis zonas de estruturas no interior do maciço rochoso



DESENHO 9/B – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LD, LE



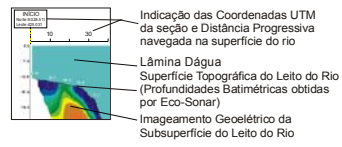
DESENHO 9/C – Seções Transversais aos Eixos 1 e 2 – Seções LF, LG, LH



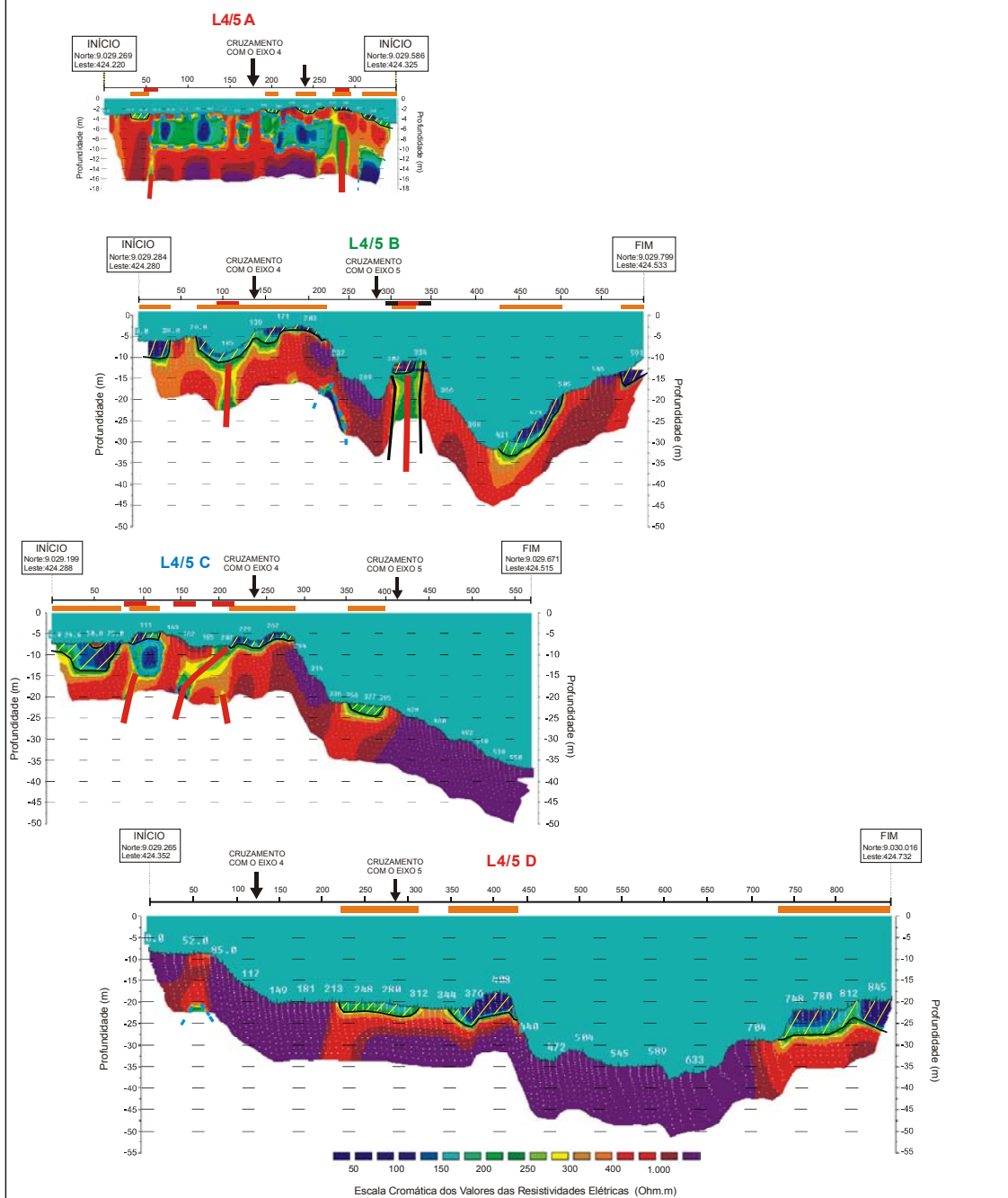
Escala Cromática dos Valores das Resistividades Elétricas (Ohm.m)

LEGENDA

- Delimitação de camadas com ocorrência dos mais baixos valores das resistividades elétricas (Possíveis ocorrências de camadas areno-argilosas sobrepostas à rocha sã e/ou ocorrências de material rochoso provavelmente alterado/fraturado)
- Projeção à superfície dos locais de ocorrência das possíveis camadas areno-argilosas e/ou rochas alteradas/fraturadas
- Zonas anômalas de baixas resistividades elétricas (Maiores probabilidades de materiais porosos e/ou saturados)
- Contato entre Unidades Geoeletricas Distintas (Prováveis ocorrências de contatos laterais entre litologias distintas)
- Indicação de possíveis estruturas geológicas (falhas, fraturas) no interior do material rochoso. (Locais favoráveis a zonas heterogêneas e percolação d'água)
- Projeção à superfície das prováveis zonas de estruturas no interior do maciço rochoso

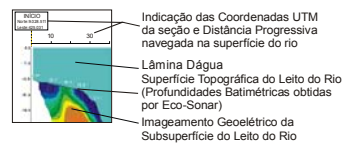


DESENHO 10 – Seções Transversais ao Eixo3 – Seções L3A, L3B, L3C e L3D



LEGENDA

- Delimitação de camadas com ocorrência dos mais baixos valores das resistividades elétricas (Possíveis ocorrências de camadas areno-argilosas sobrepostas à rocha sã e/ou ocorrências de material rochoso provavelmente alterado/fraturado)
- Projeção à superfície dos locais de ocorrência das possíveis camadas areno-argilosas e/ou rochas alteradas/fraturadas
- Zonas anômalas de baixas resistividades elétricas (Maiores probabilidades de materiais porosos e/ou saturados)
- Contato entre Unidades Geoeletricas Distintas (Prováveis ocorrências de contatos laterais entre litologias distintas)
- Indicação de possíveis estruturas geológicas (falhas, fraturas) no interior do material rochoso. (Locais favoráveis a zonas heterogêneas e percolação d'água)
- Projeção à superfície dos locais de ocorrência dos Contatos Geoeletricos mapeados pelo Imageamento Geoeletrico da subsuperfície do Leito do Rio São Francisco
- Projeção à superfície das prováveis zonas de estruturas no interior do maciço rochoso



DESENHO 11 – Seções Transversais aos Eixos 4 e 5 – Seções L4/5A, L4/5B, L4/5C e L4/5D

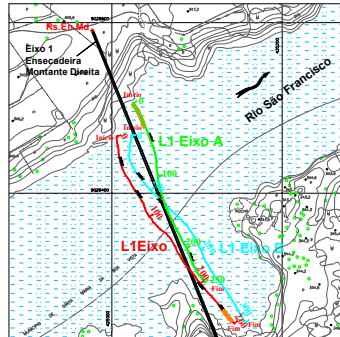
ANEXO 3

PLANTAS SÍNTESE

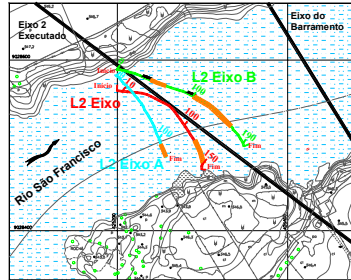
DESENHO 12 – Planta Síntese das Informações Geofísicas – Eixos 1, 2 e 3

DESENHO 13 – Planta Síntese das Informações Geofísicas – Eixos 4 e 5

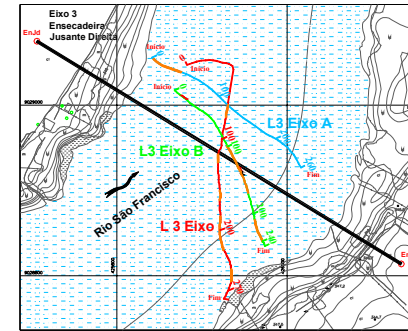
EIXO 1 ENSECADEIRA_MD



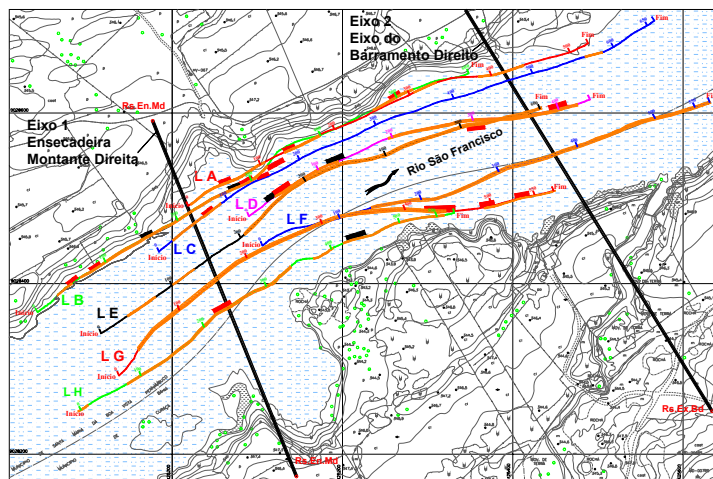
EIXO 2 BARRAMENTO_MD



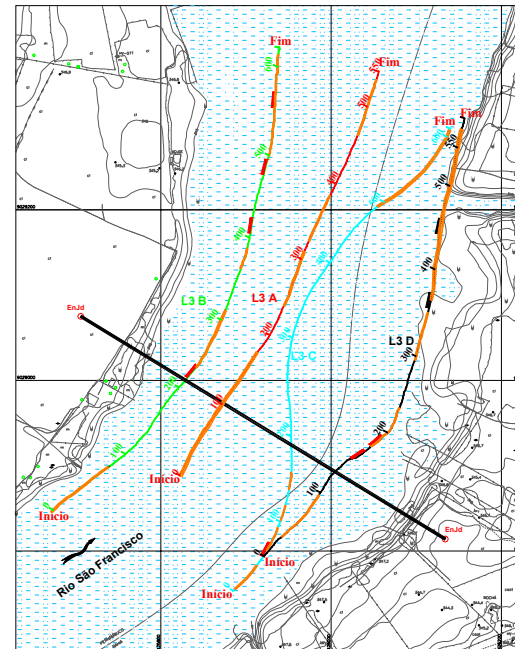
EIXO 3 ENSECADEIRA_JD






EIXOS 1 e 2 LONGITUDINAIS



EIXO 3 LONGITUDINAIS

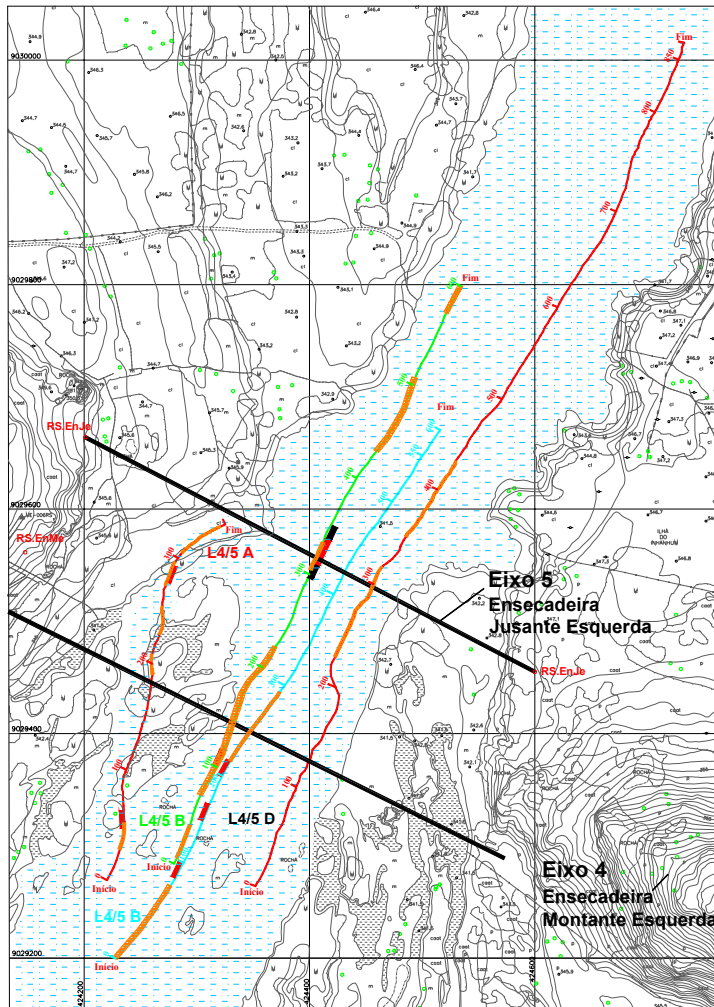


LEGENDA

-  *Projeção à superfície dos locais de ocorrência dos Contatos Geolétricos mapeados pelo Imageamento Geolétrico da subsuperfície do Leito do Rio São Francisco*
-  *Projeção à superfície das prováveis zonas de estruturas no interior do maciço rochoso*
-  *Possíveis ocorrências de camadas areno-argilosas sobrepostas à rocha sã e/ou ocorrências de material rochoso provavelmente alterado/fraturado*

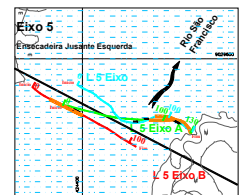
DESENHO 12 – Planta Síntese das Informações Geofísicas – Eixos 1, 2 e 3

DESENHO 13 - Planta Síntese das Informações Geofísicas - Eixos 4 e 5

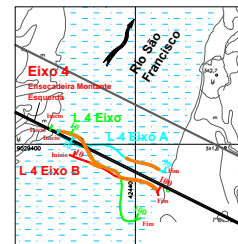


EIXOS 4 e 5 LONGITUDINAIS




EIXO 5 ENSECADURA_JE



EIXO 4 ENSECADURA_ME



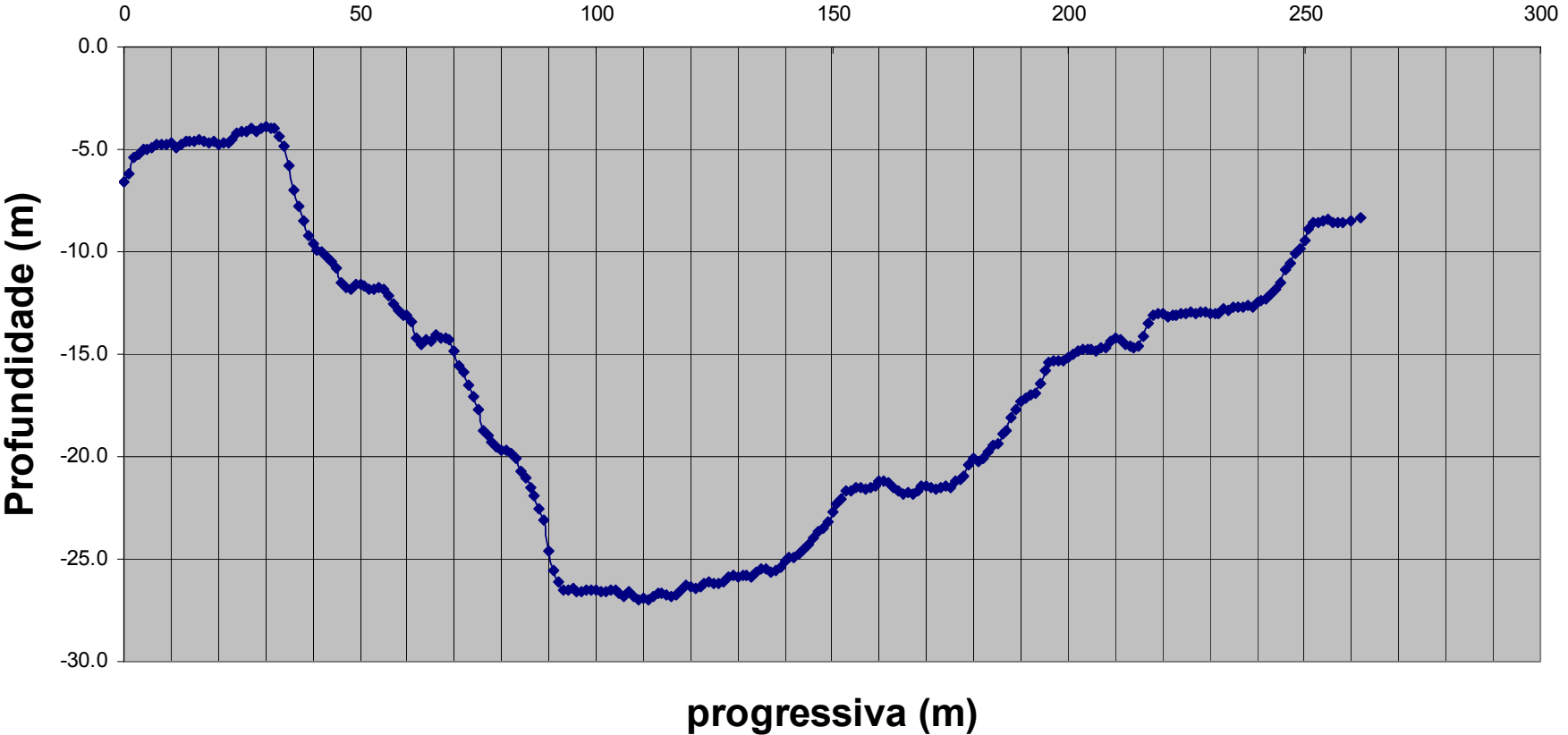
LEGENDA

-  *Projeção à superfície dos locais de ocorrência dos Contatos Geolétricos mapeados pelo Imageamento Geolétrico da subsuperfície do Leito do Rio São Francisco*
-  *Projeção à superfície das prováveis zonas de estruturas no interior do maciço rochoso*
-  *Possíveis ocorrências de camadas areno-argilosas sobpostas à rocha sã e/ou ocorrências de material rochoso provavelmente alterado/fraturado*

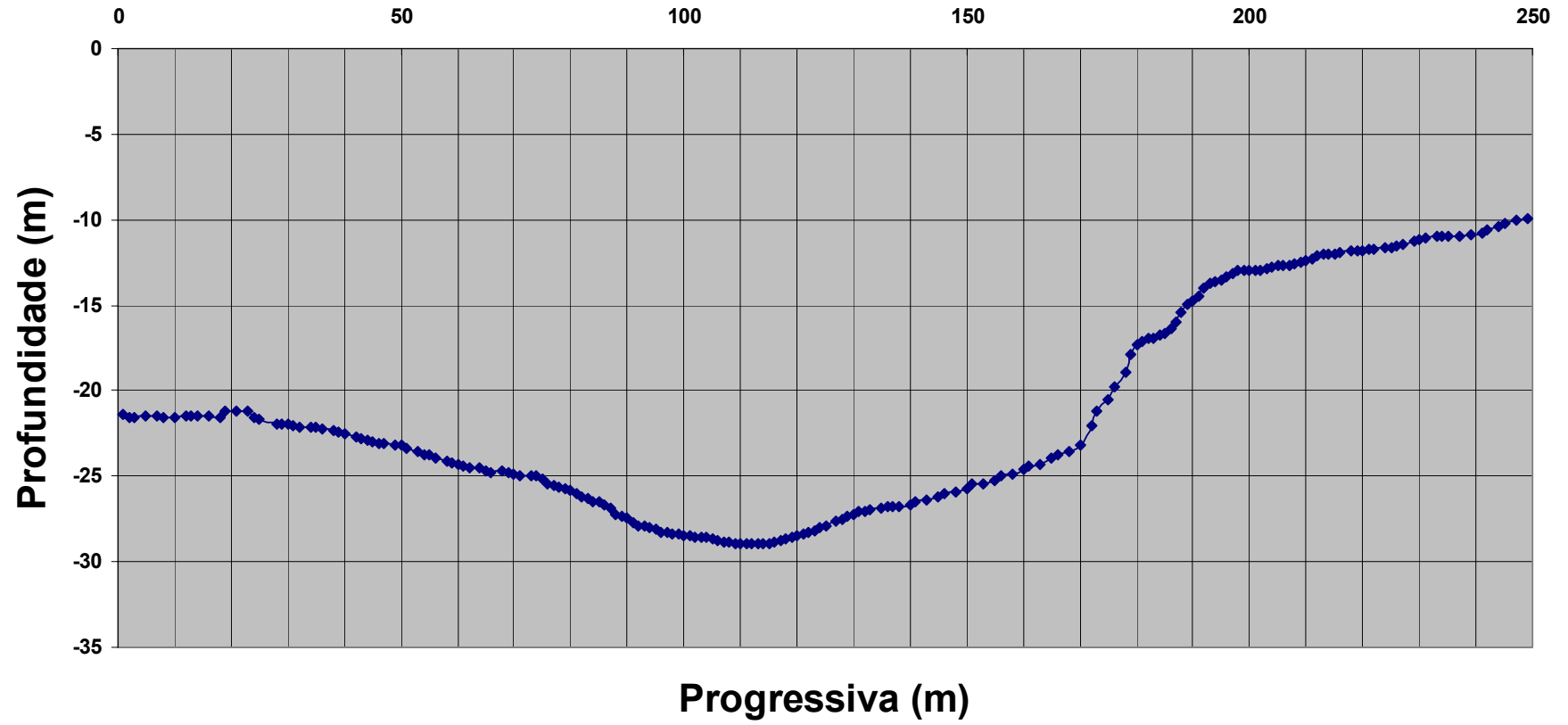
ANEXO 4

SEÇÕES BATIMÉTRICAS

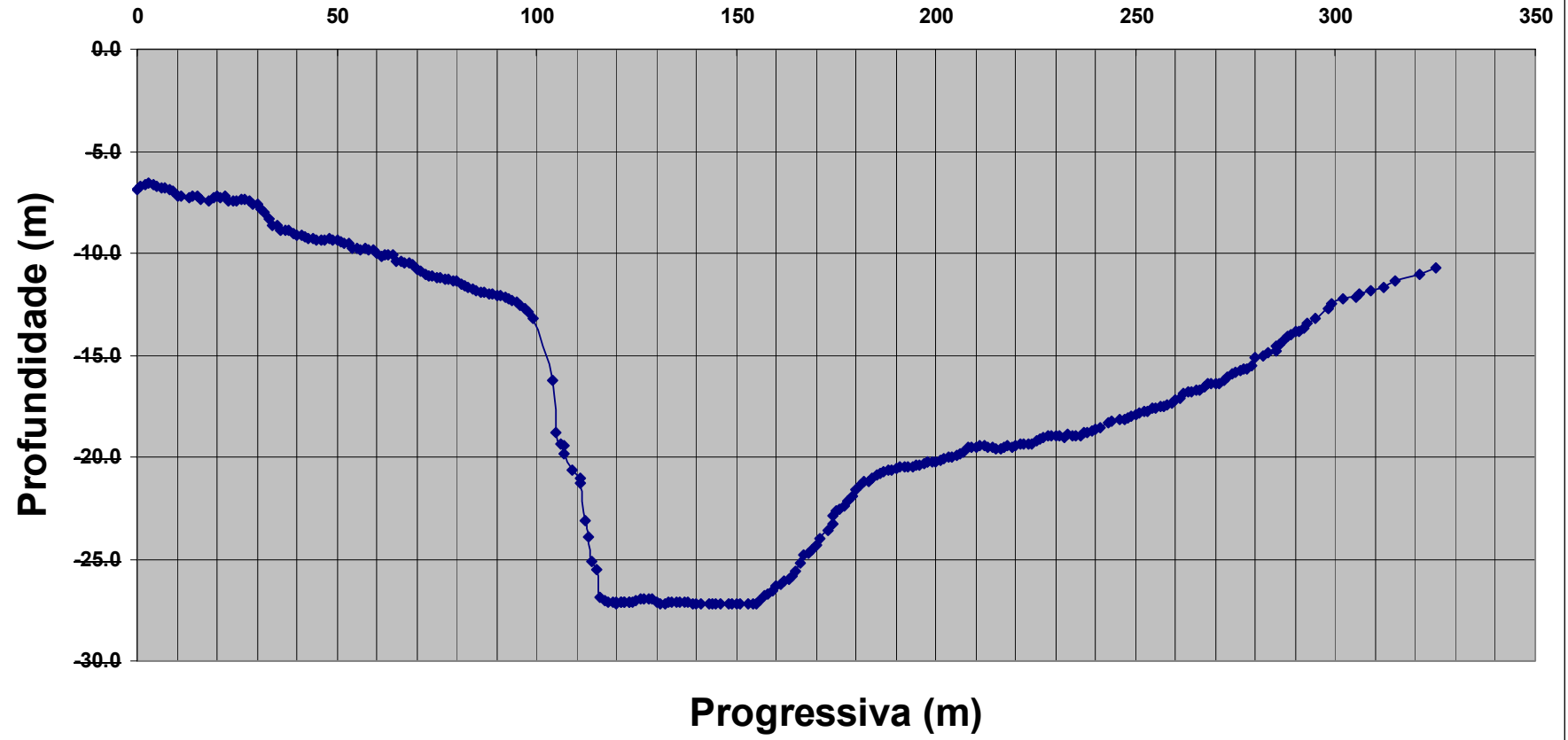
Seção Batimétrica L1 Eixo



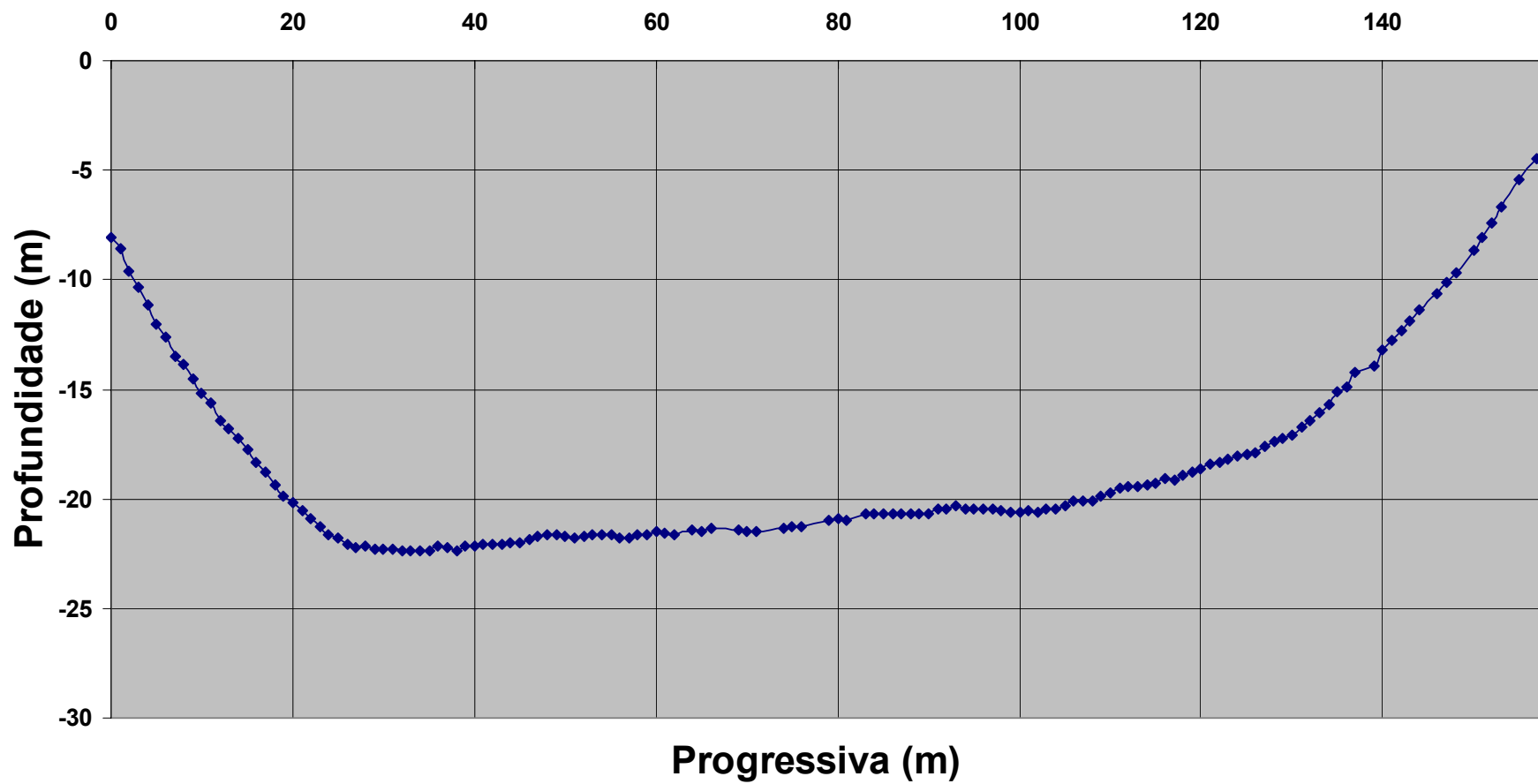
Batimetria L1 Eixo A



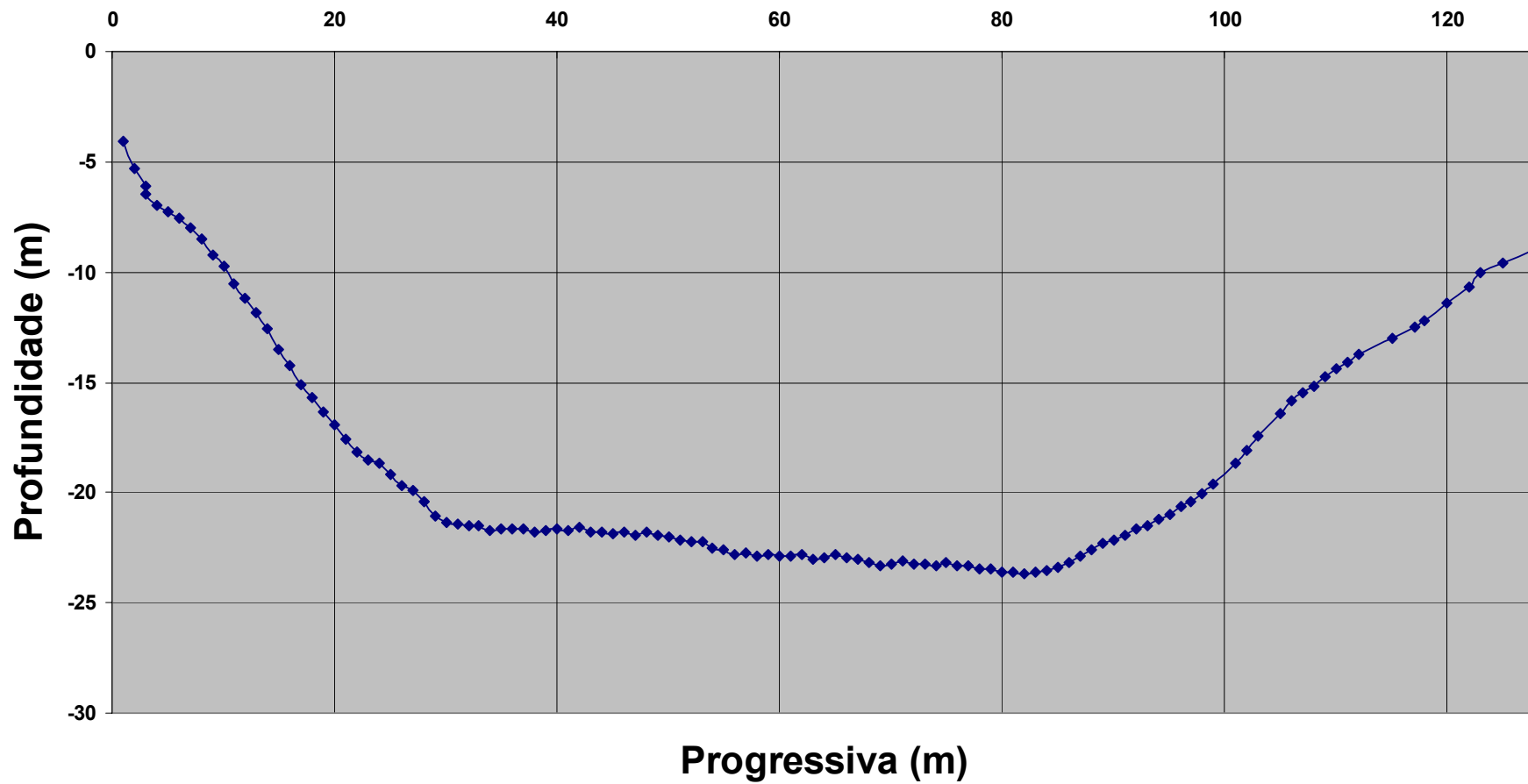
Batimetria L1 Eixo B



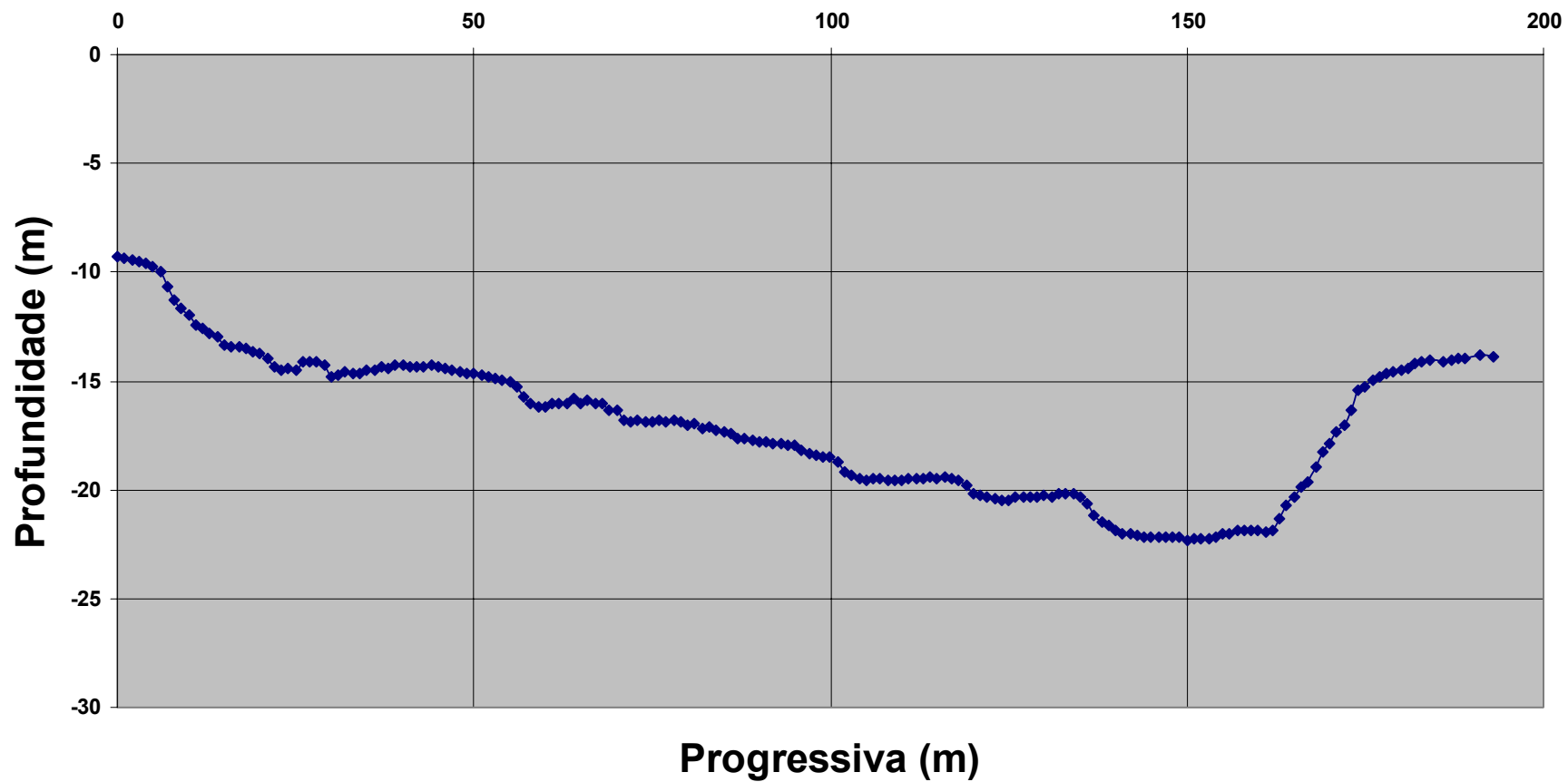
Seção Batimétrica L2 Eixo



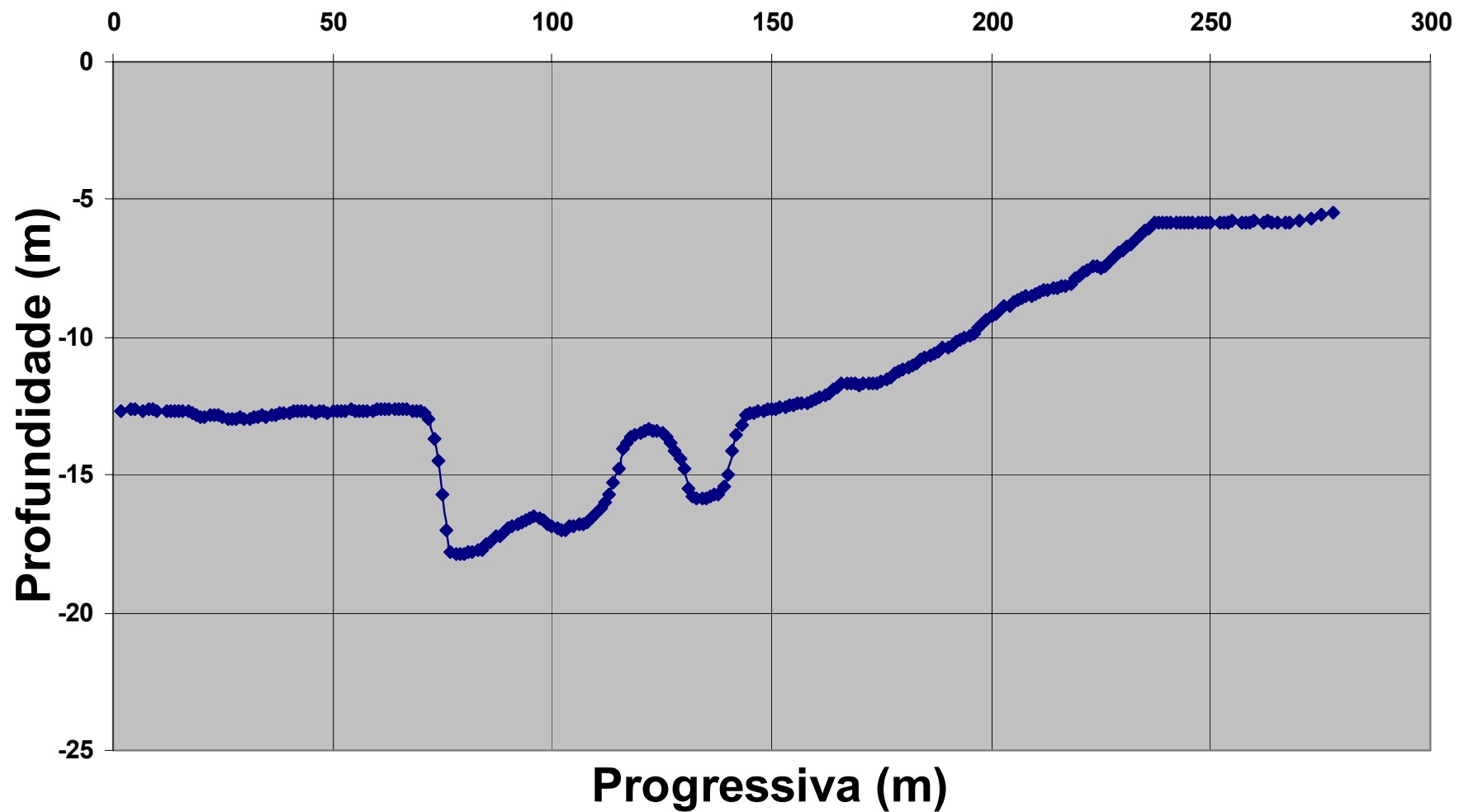
Seção Batimétrica L2 Eixo A



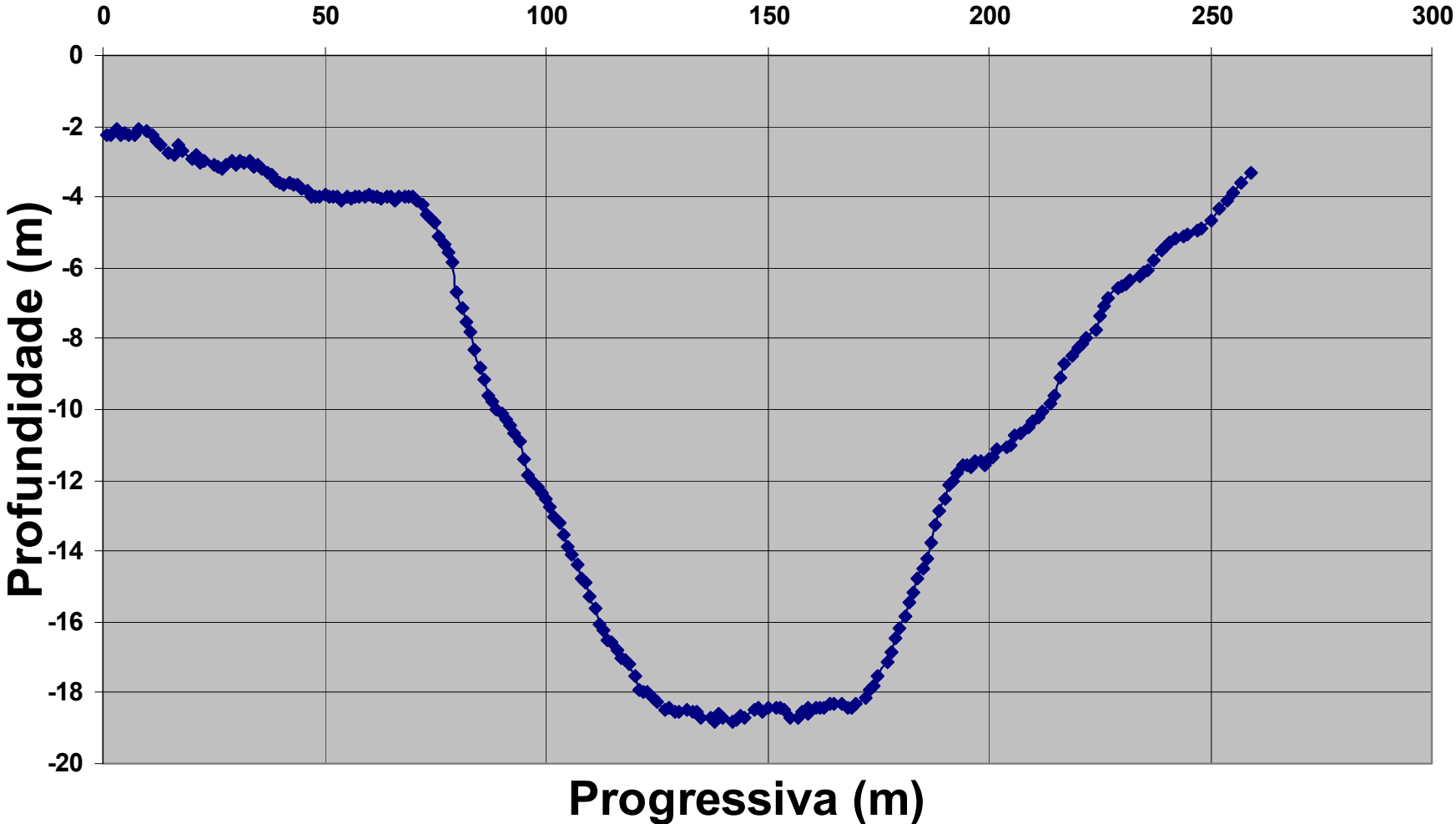
Seção Batimétrica L 2 Eixo B



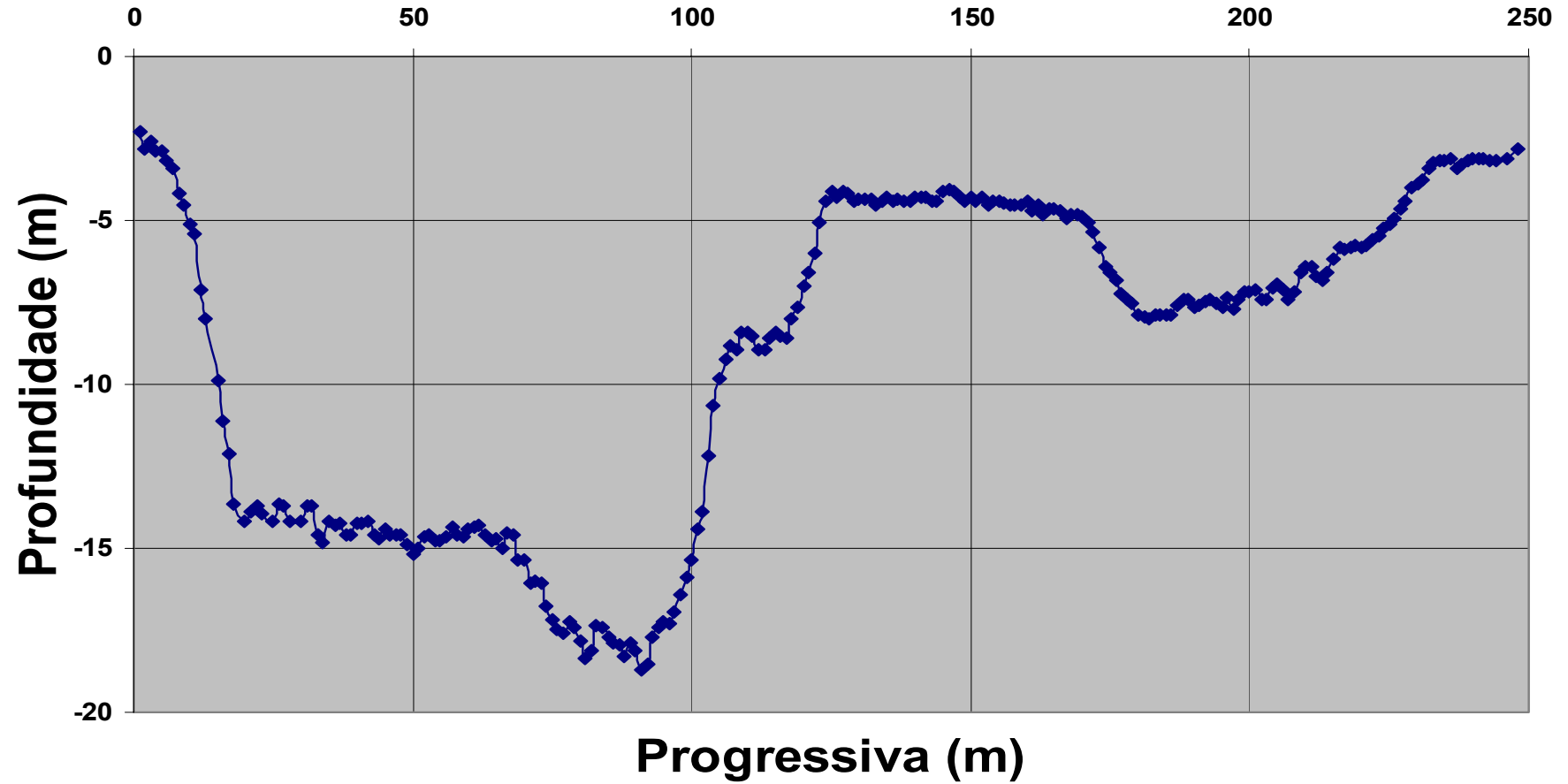
Seção Batimétrica L3 Eixo



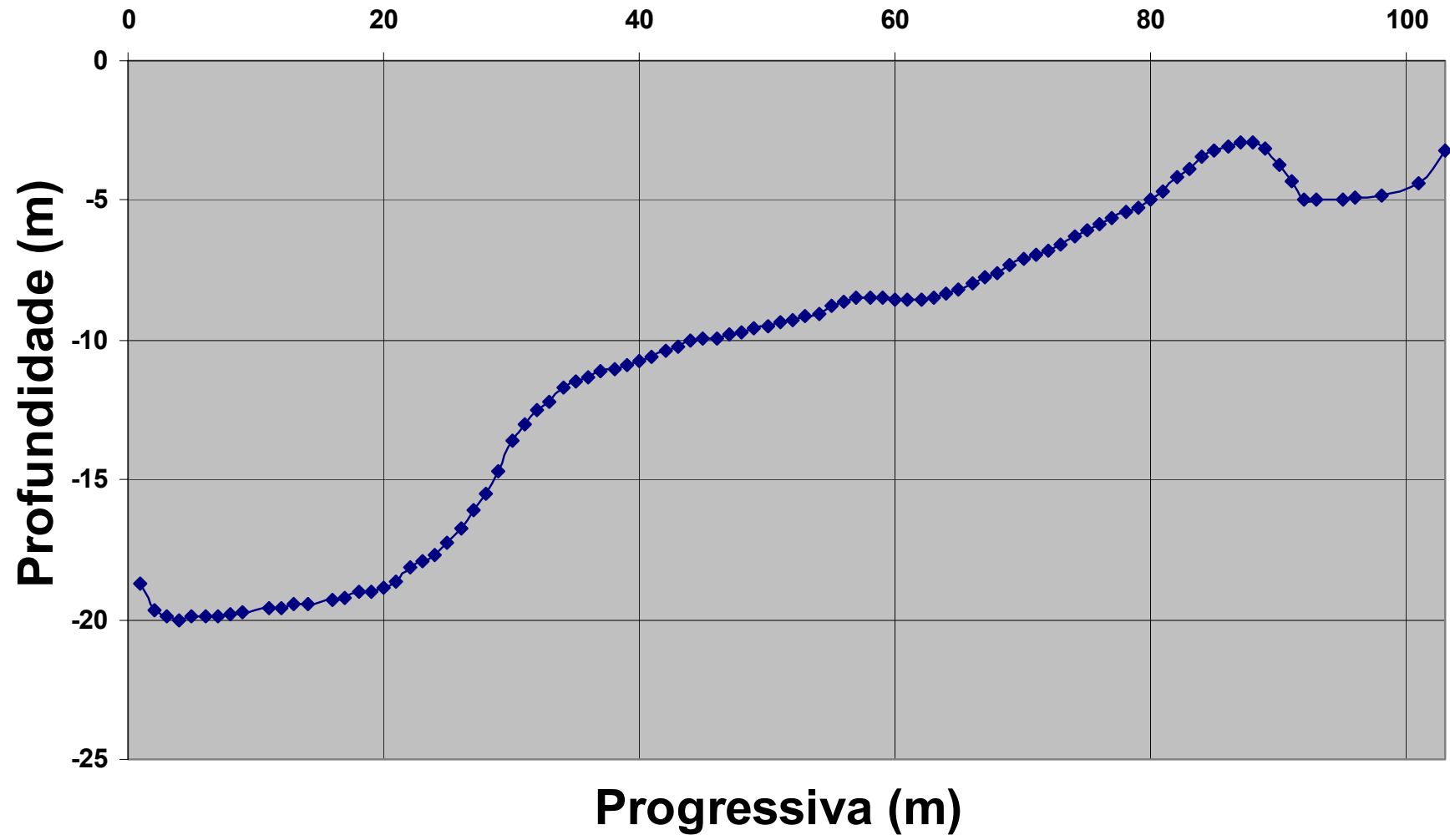
Seção Batimétrica L3 Eixo A



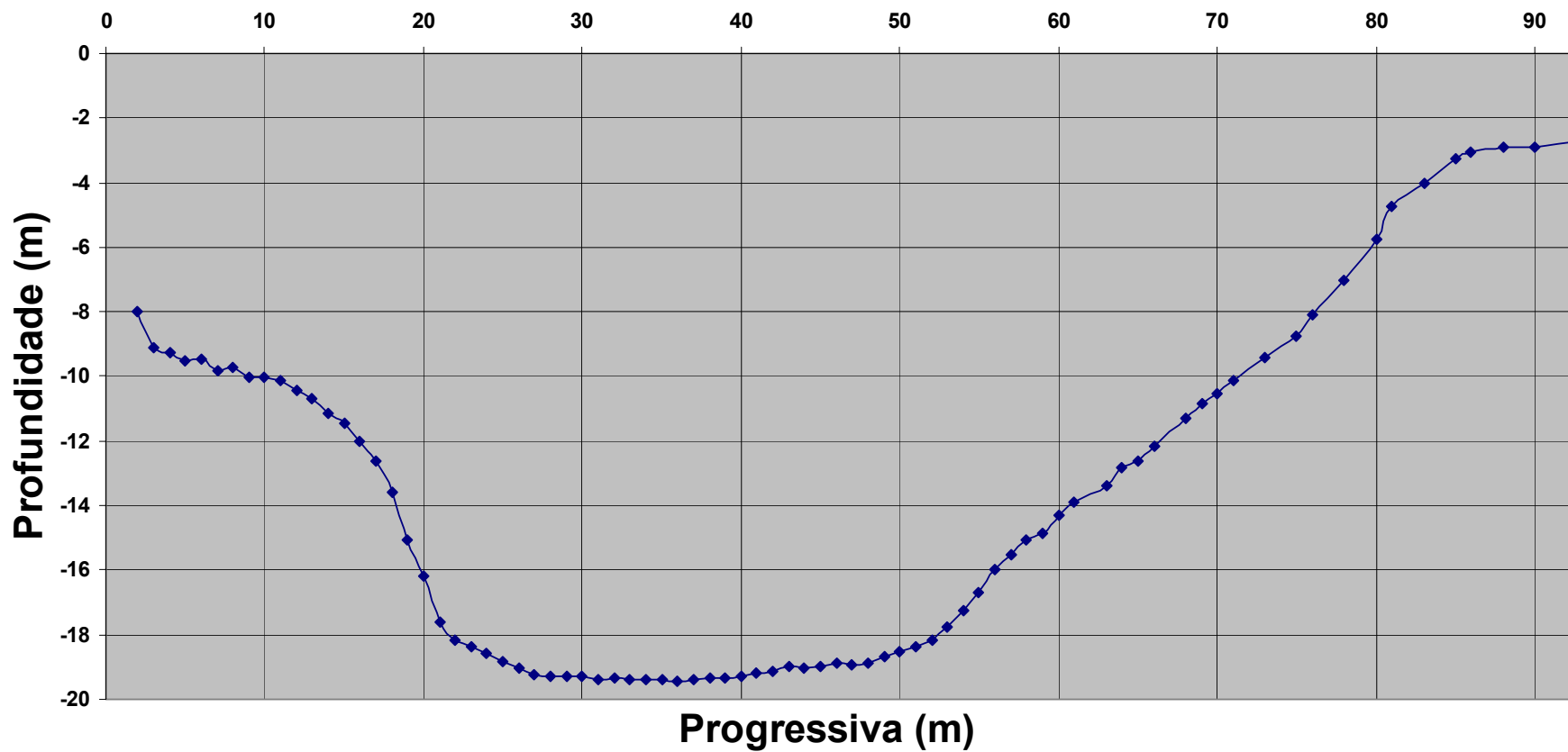
Seção Batimétrica L3 Eixo B



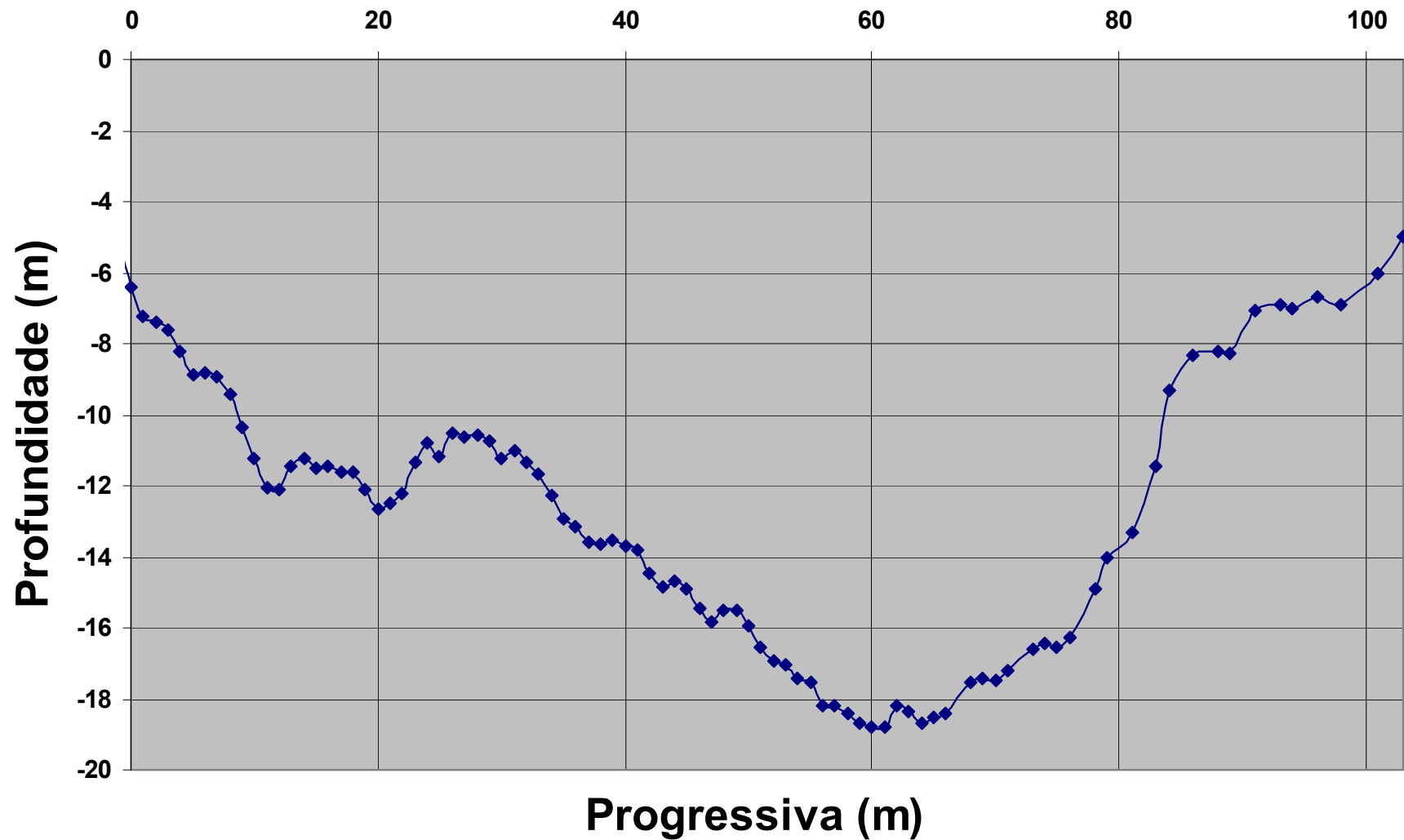
Seção Batimétrica L4 Eixo



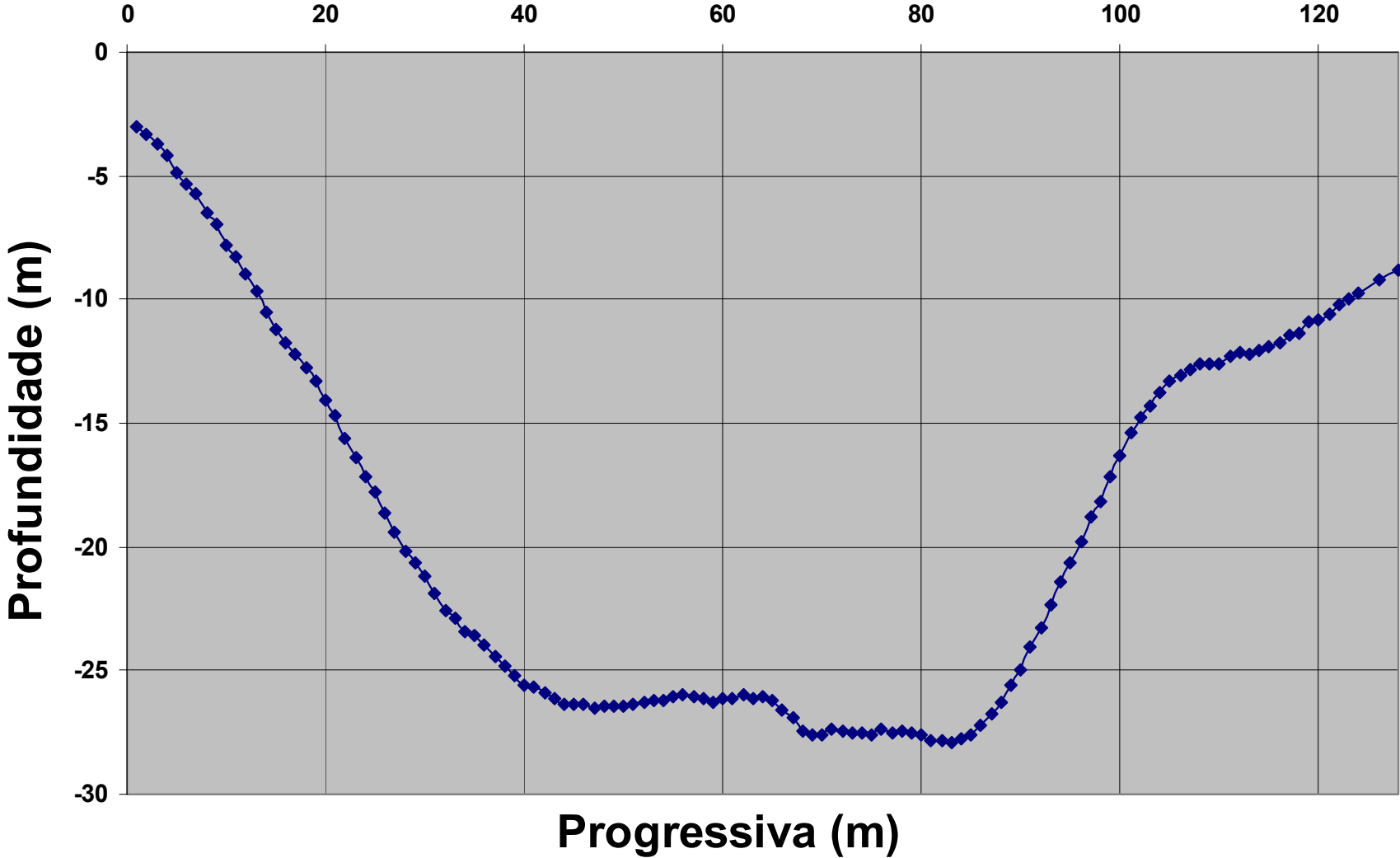
Seção Batimétrica L4 Eixo A



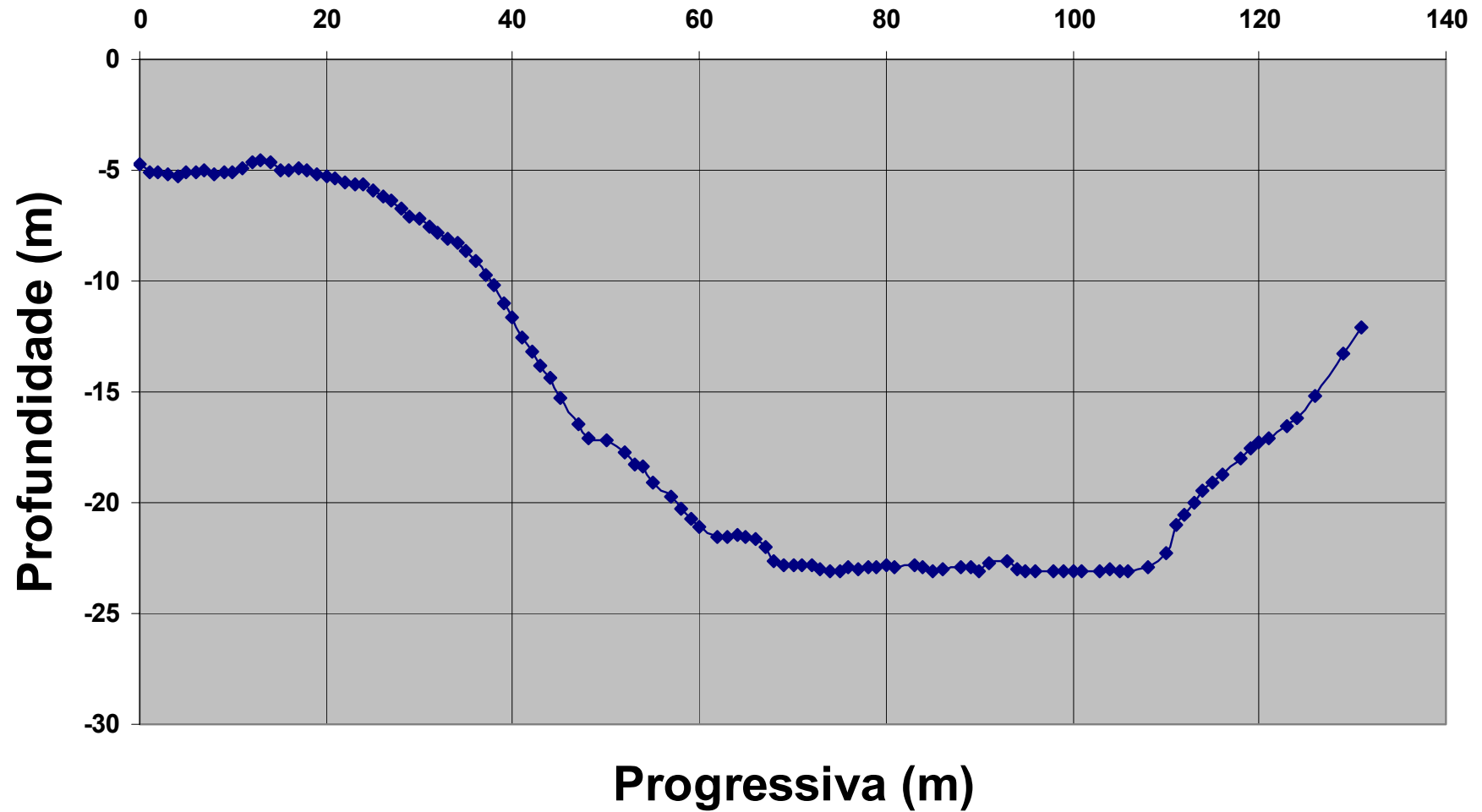
Seção Batimétrica L4 Eixo B



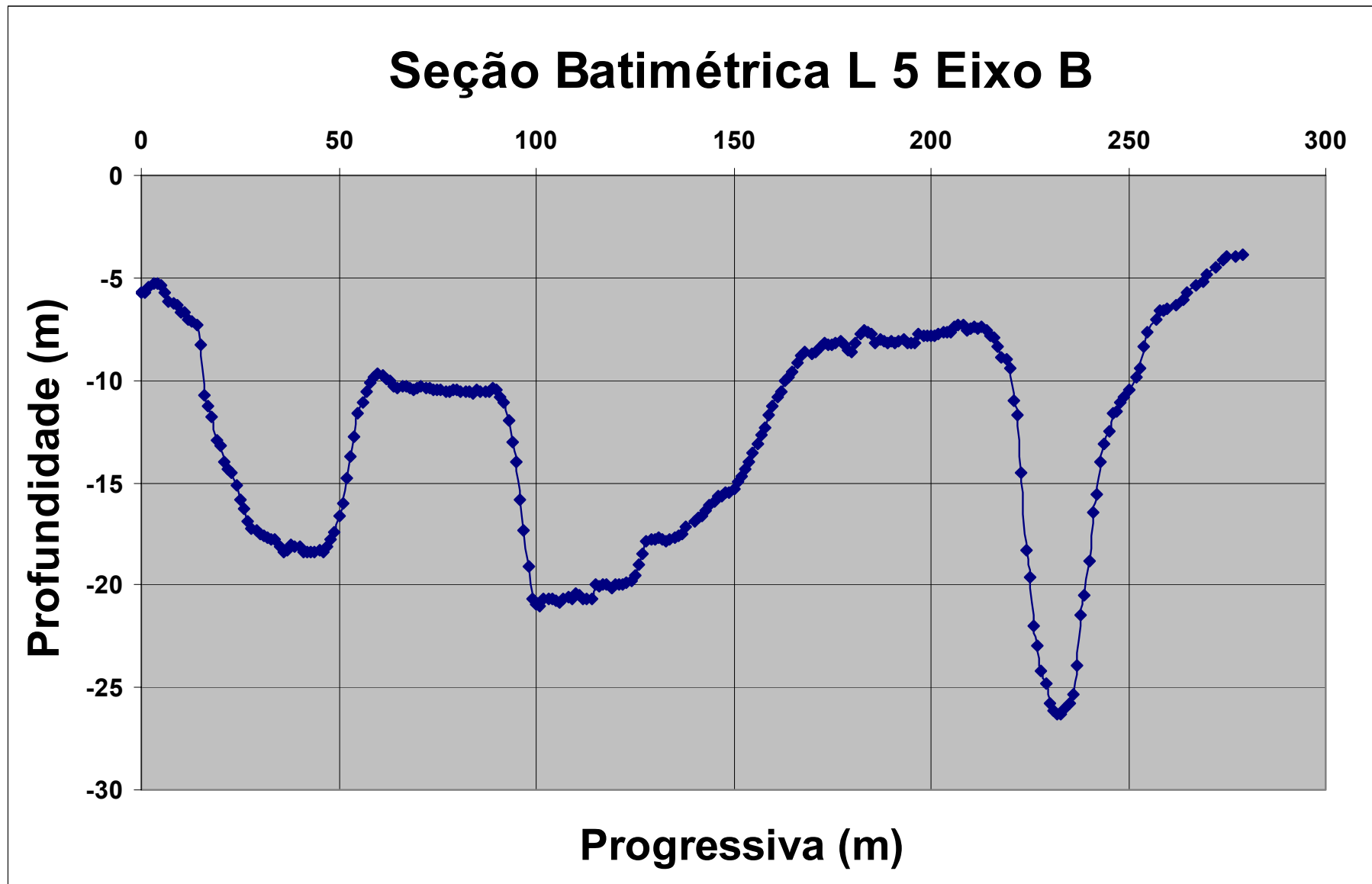
Seção Batimétrica L5 Eixo



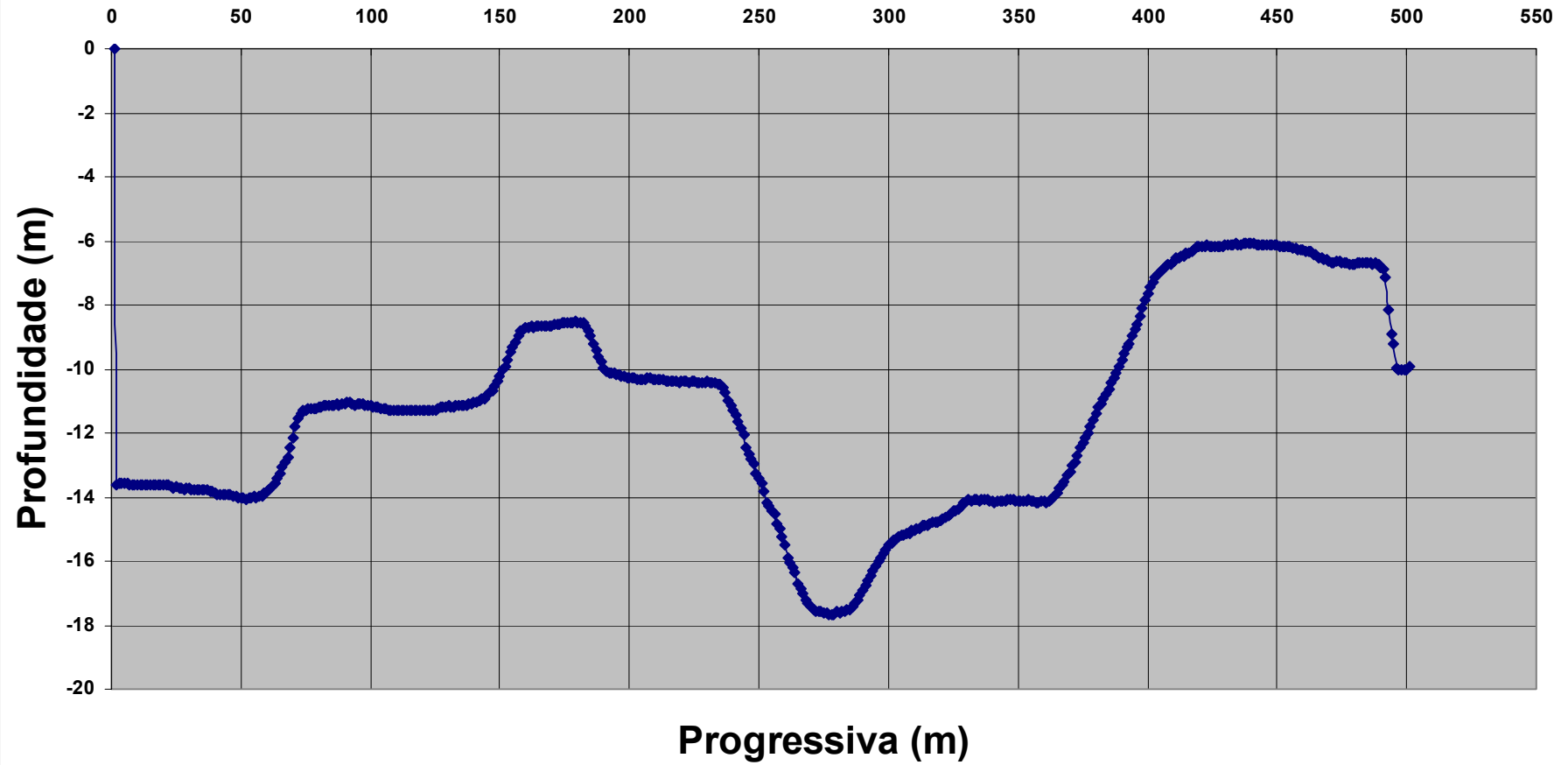
Seção Batimétrica L5 Eixo A



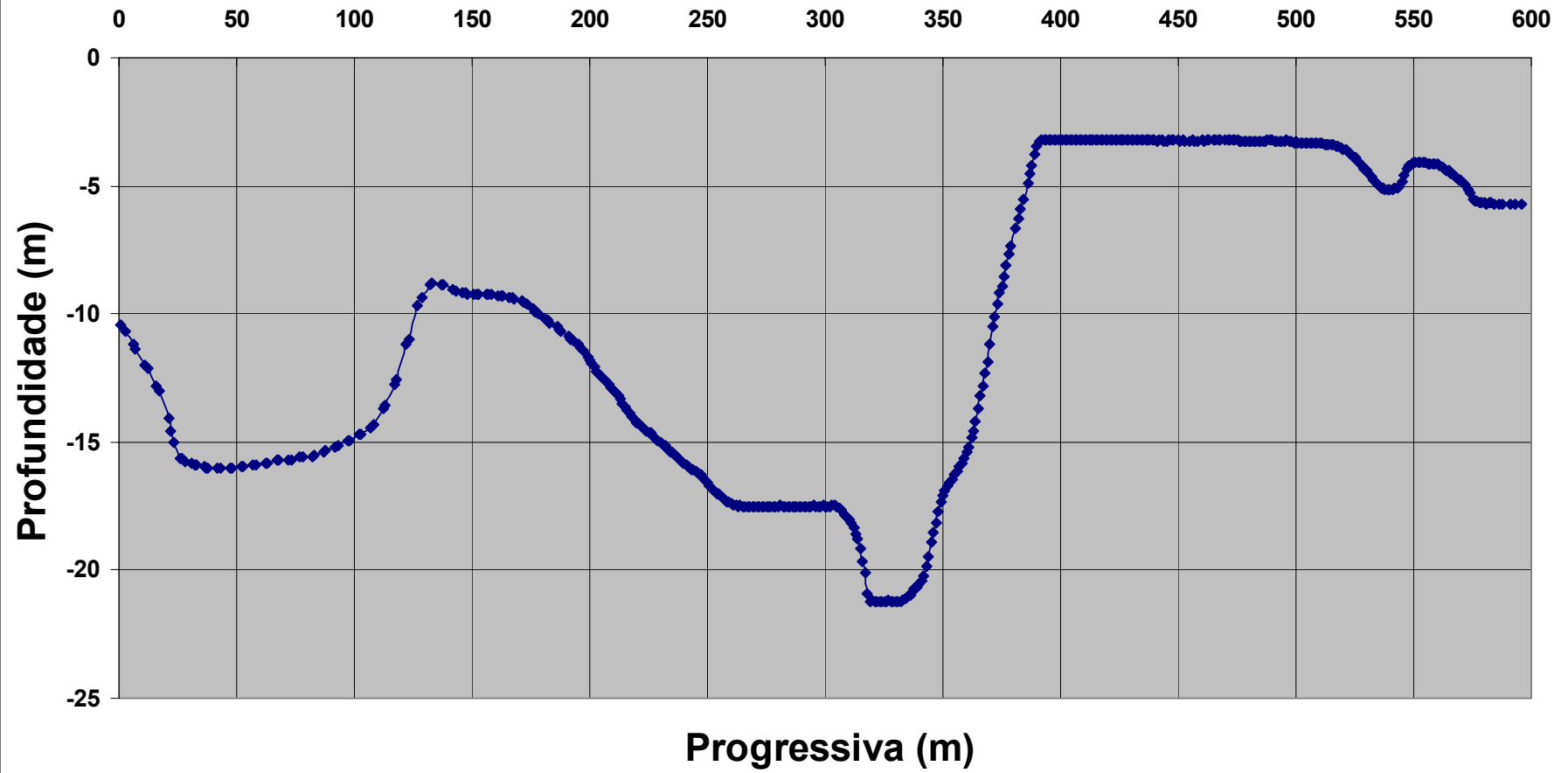
]



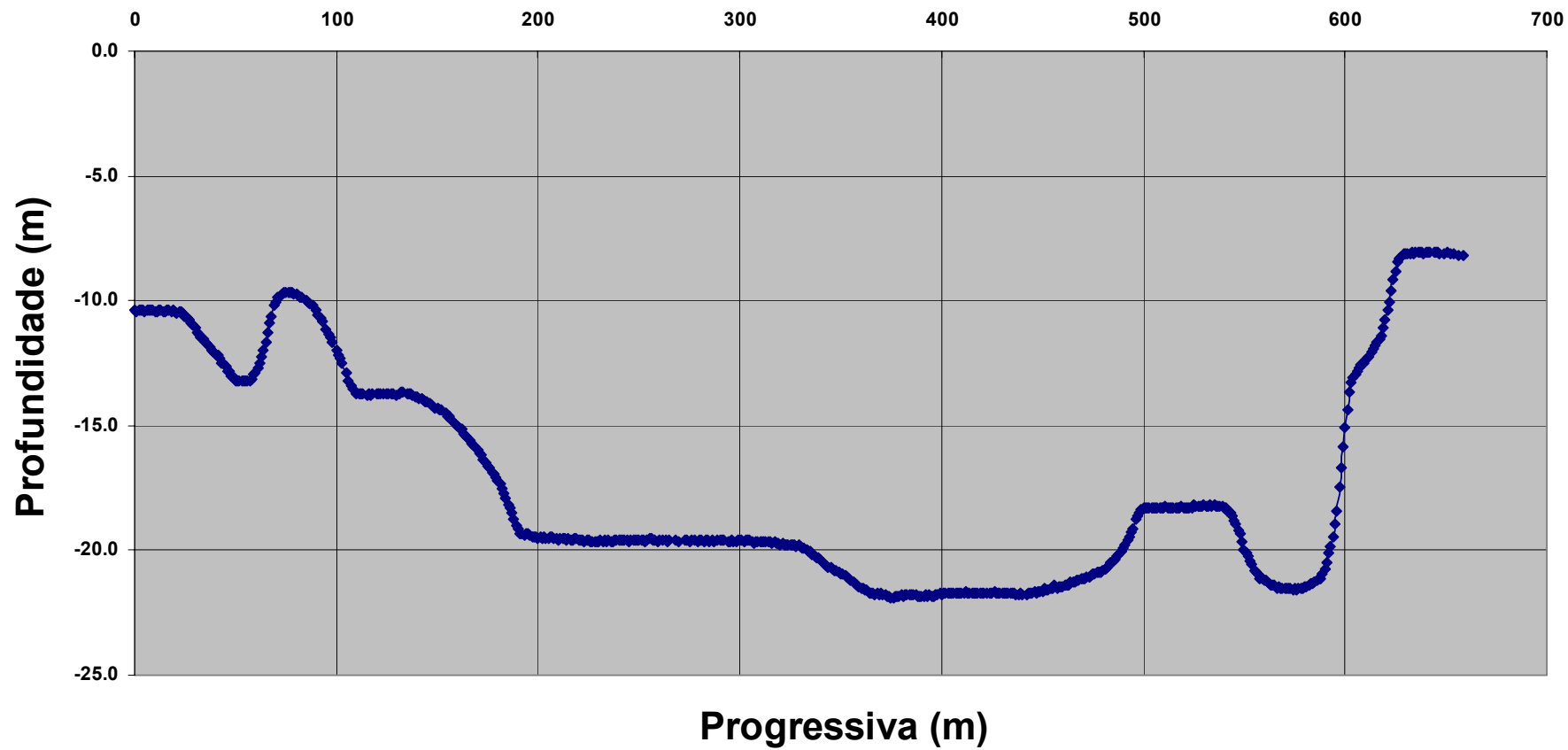
Seção Batimétrica LA



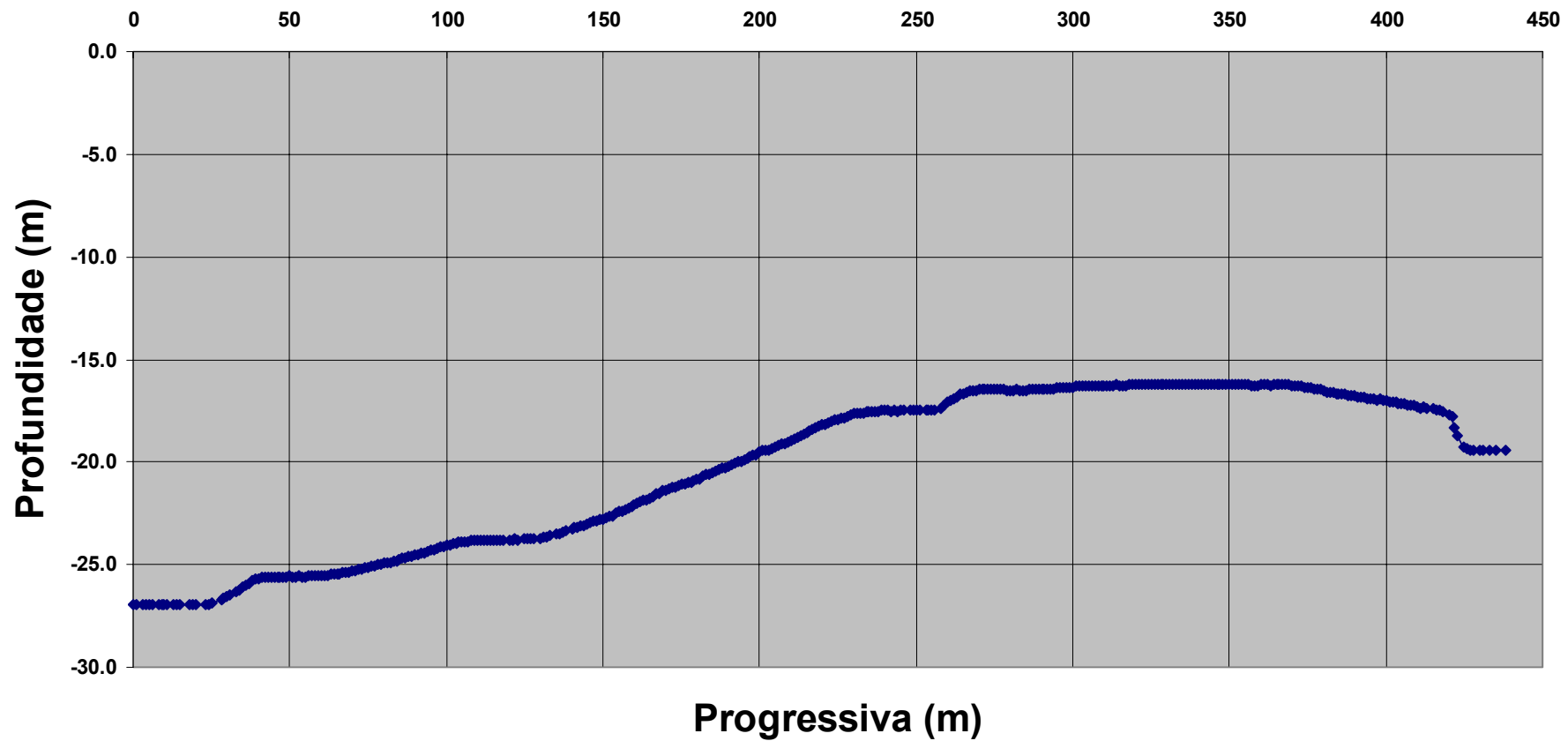
Seção Batimétrica LB



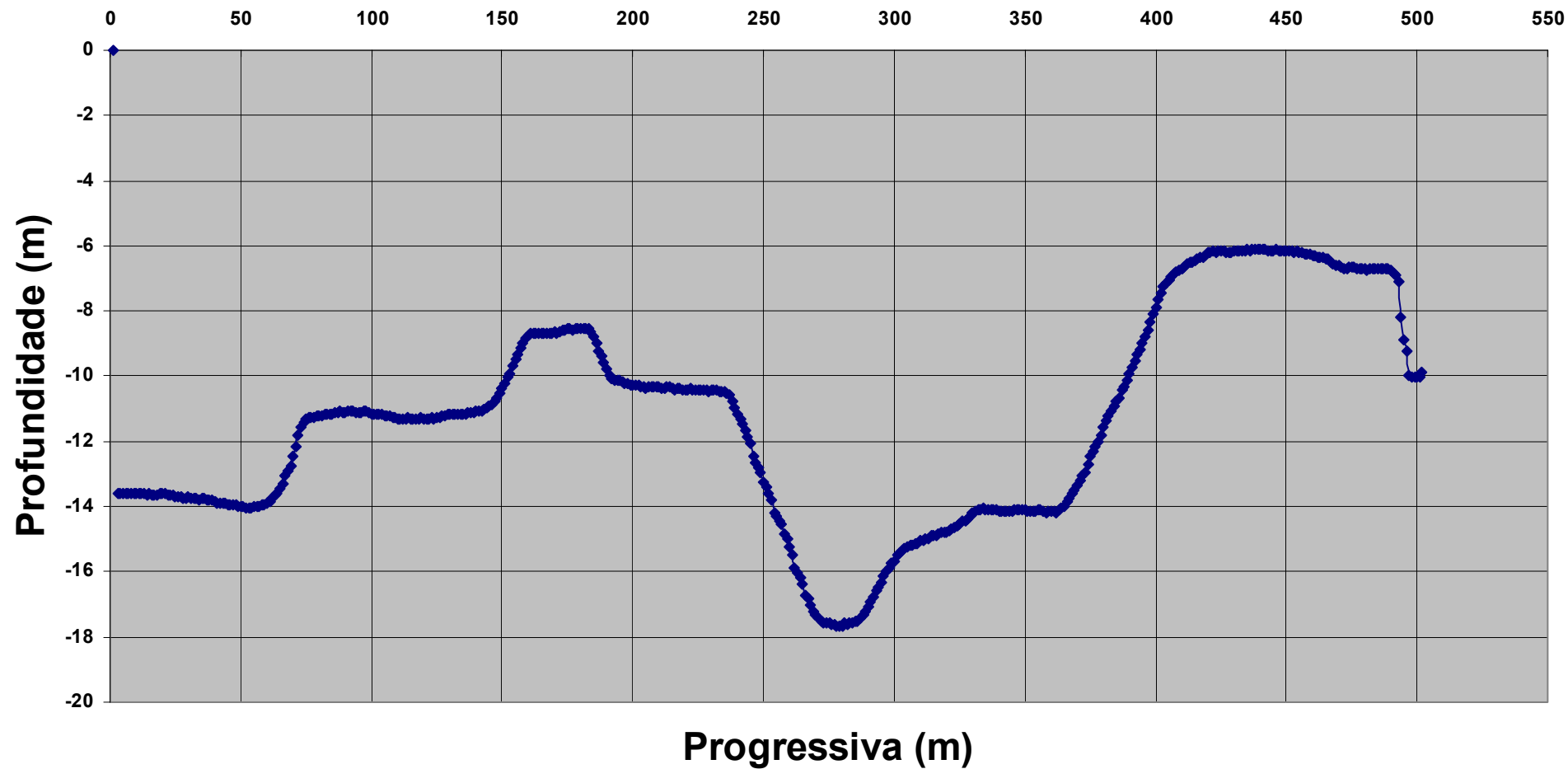
Seção Batimétrica LC



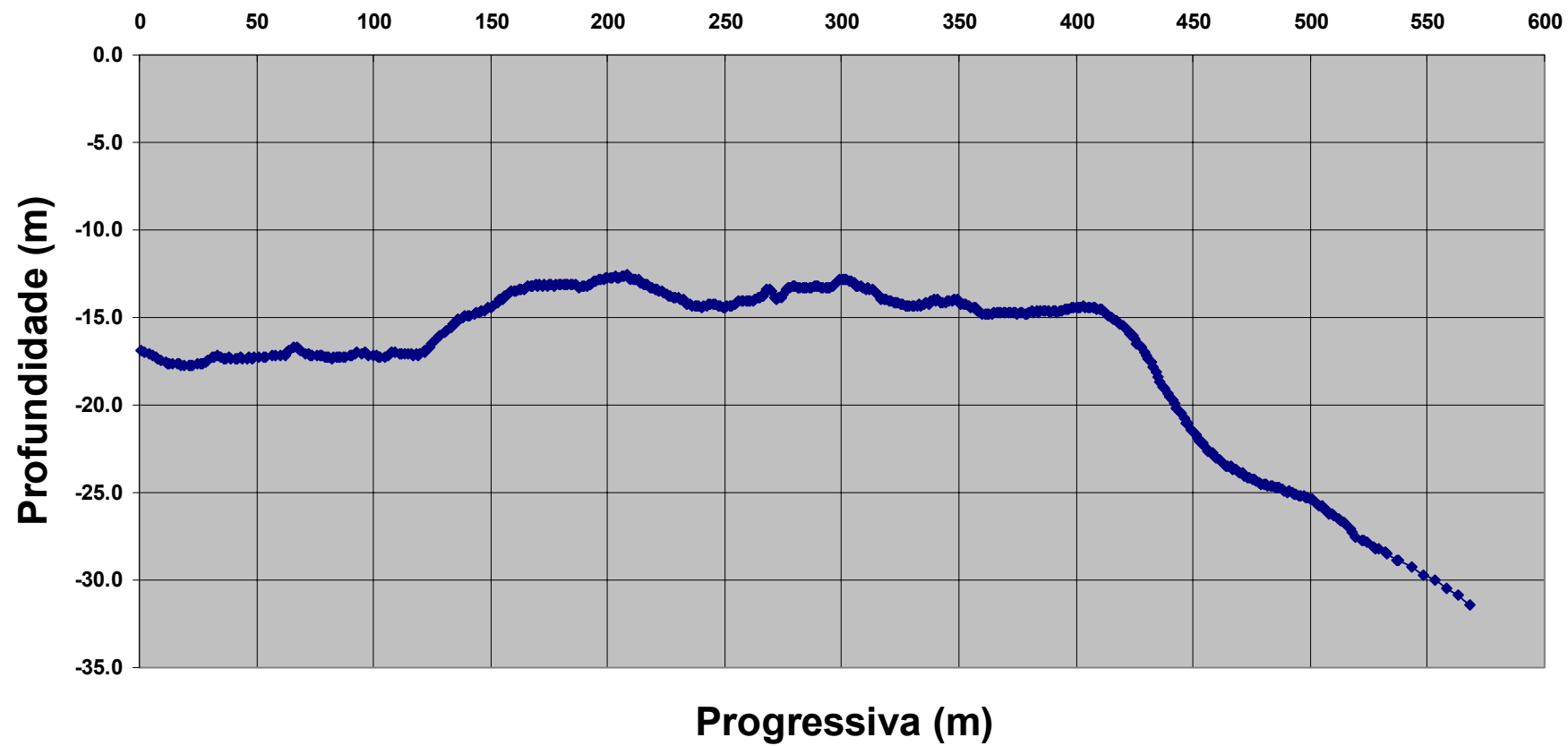
Seção Batimétrica LD



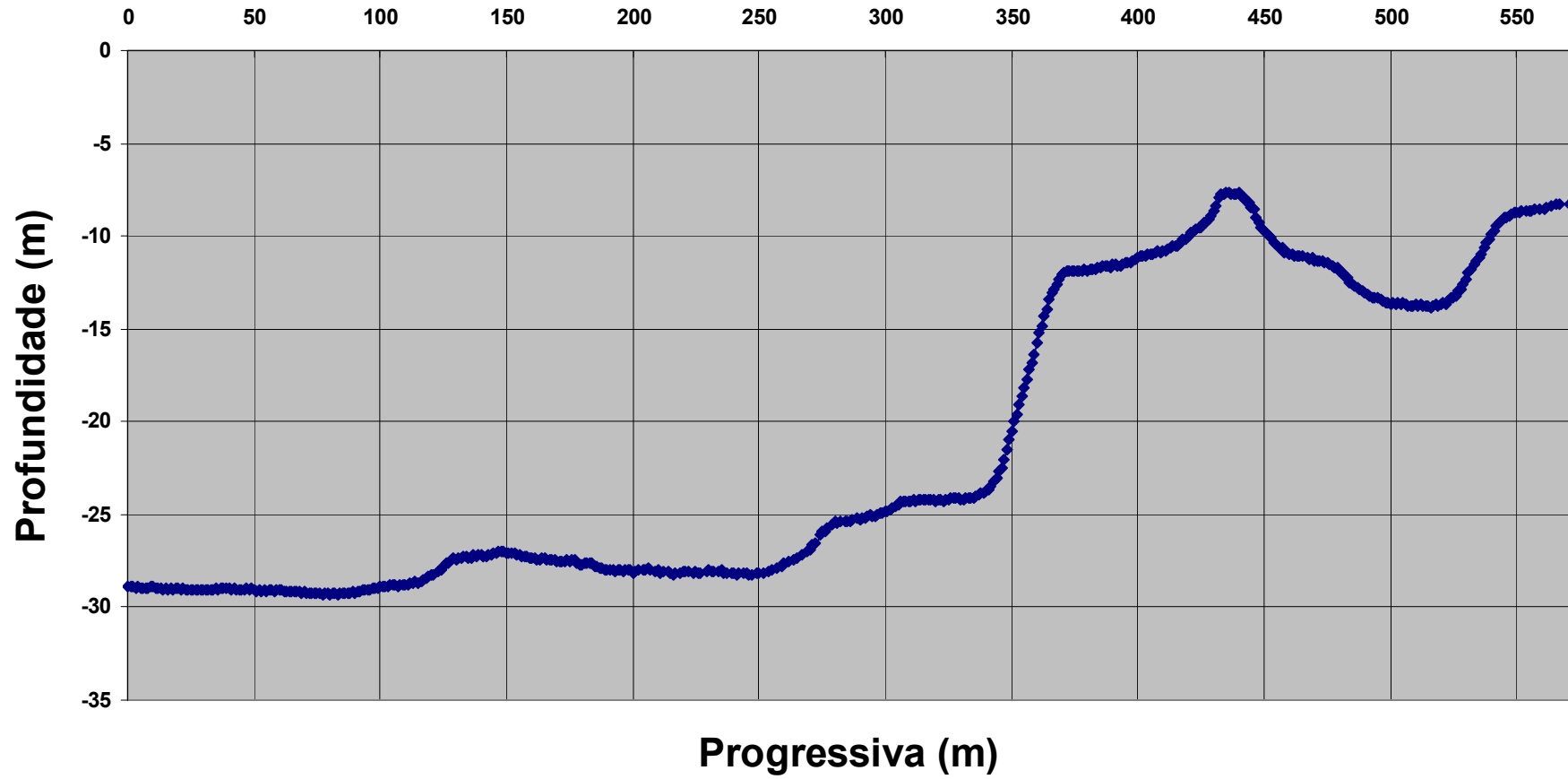
Seção Batimétrica LE



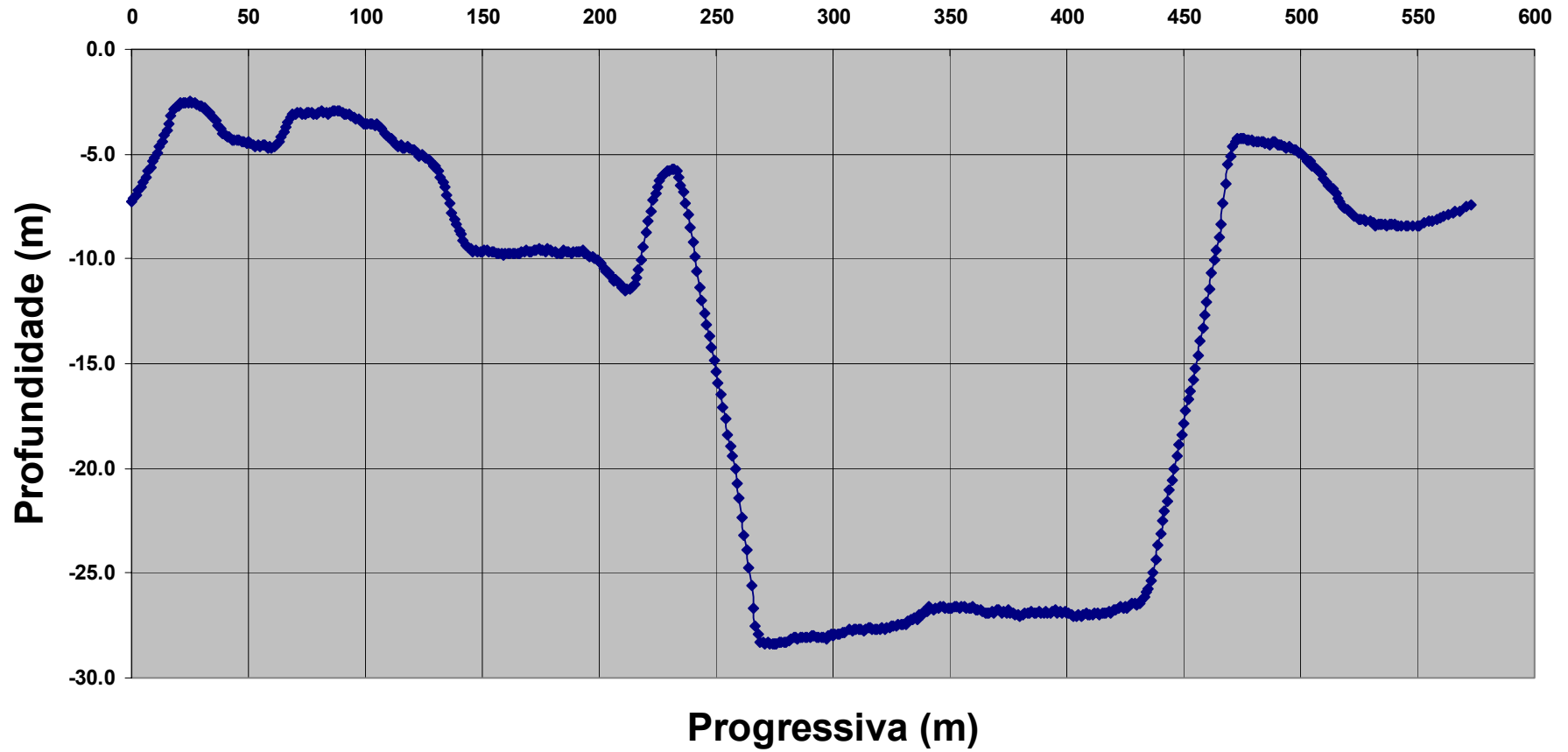
Seção Batimétrica LF



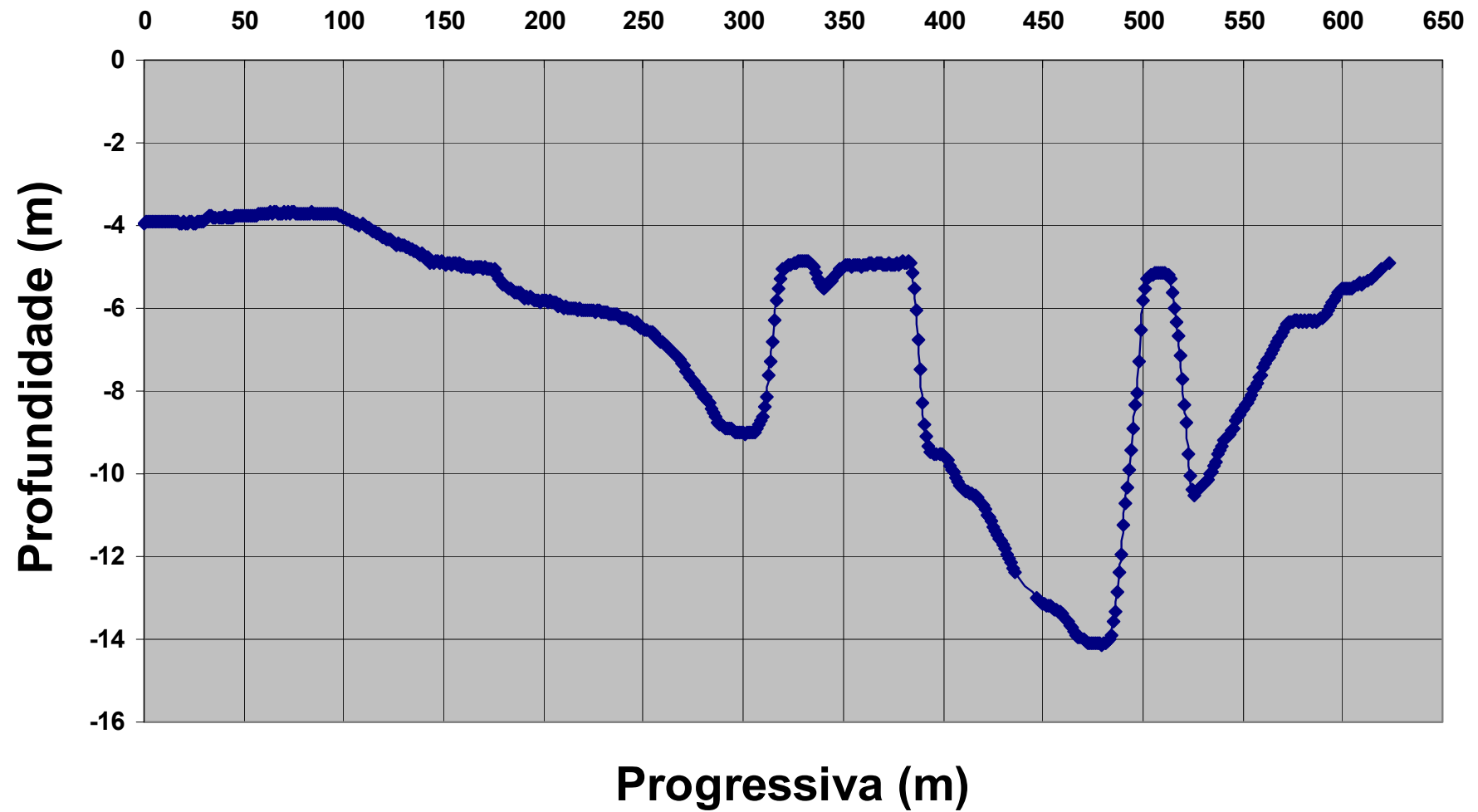
Seção Batimétrica LG



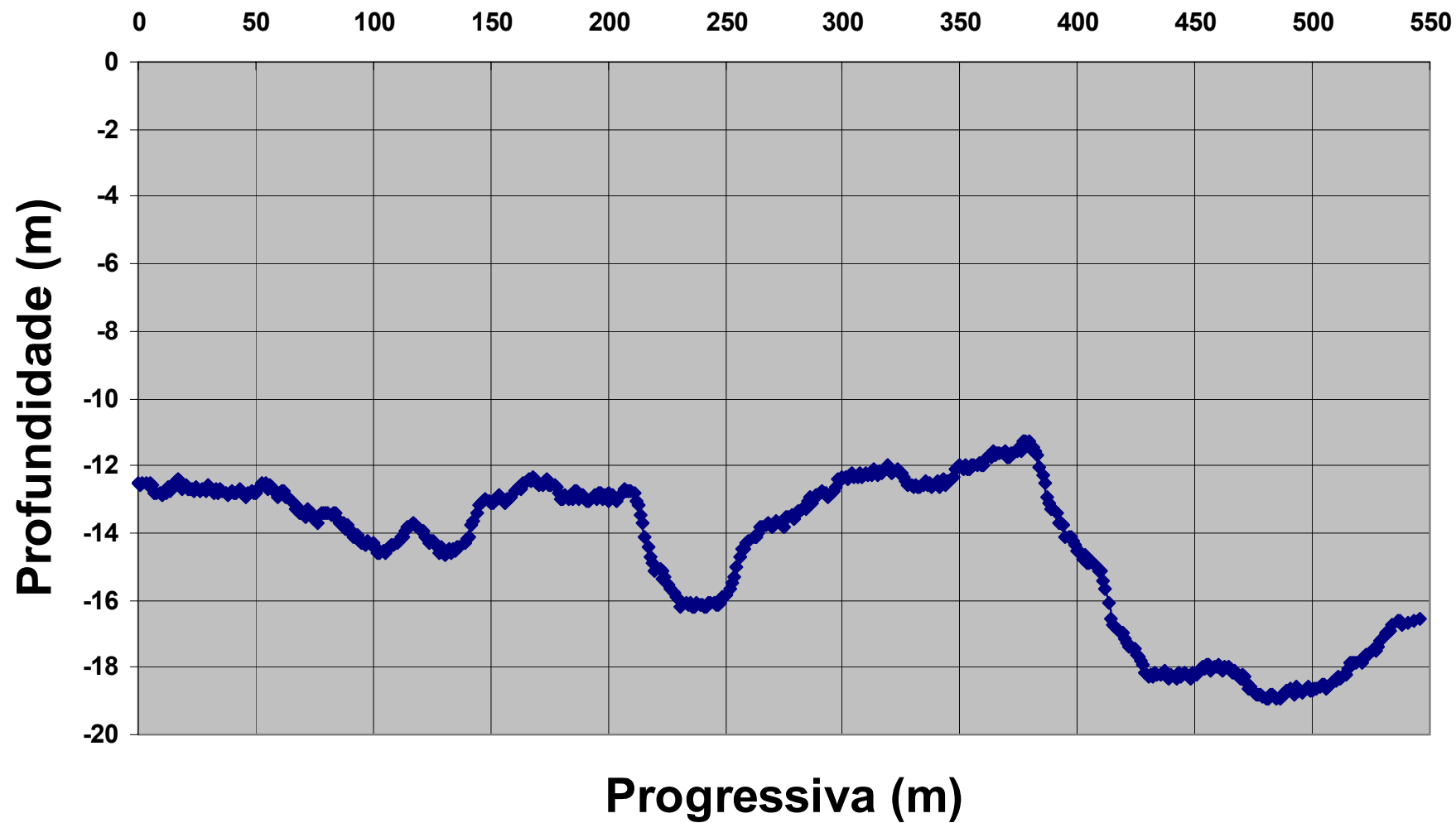
Seção Batimétrica LH



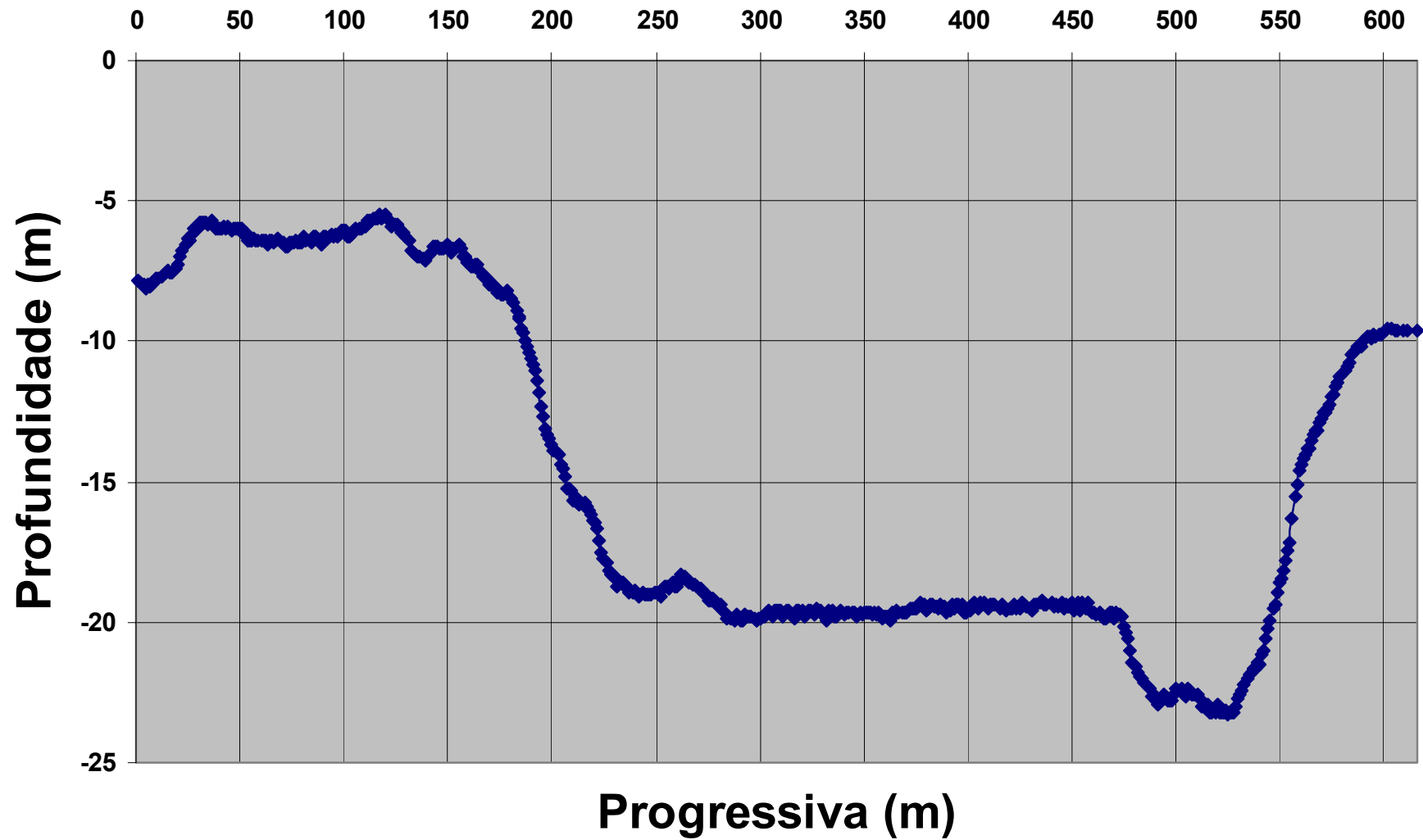
Seção Batimétrica L3A



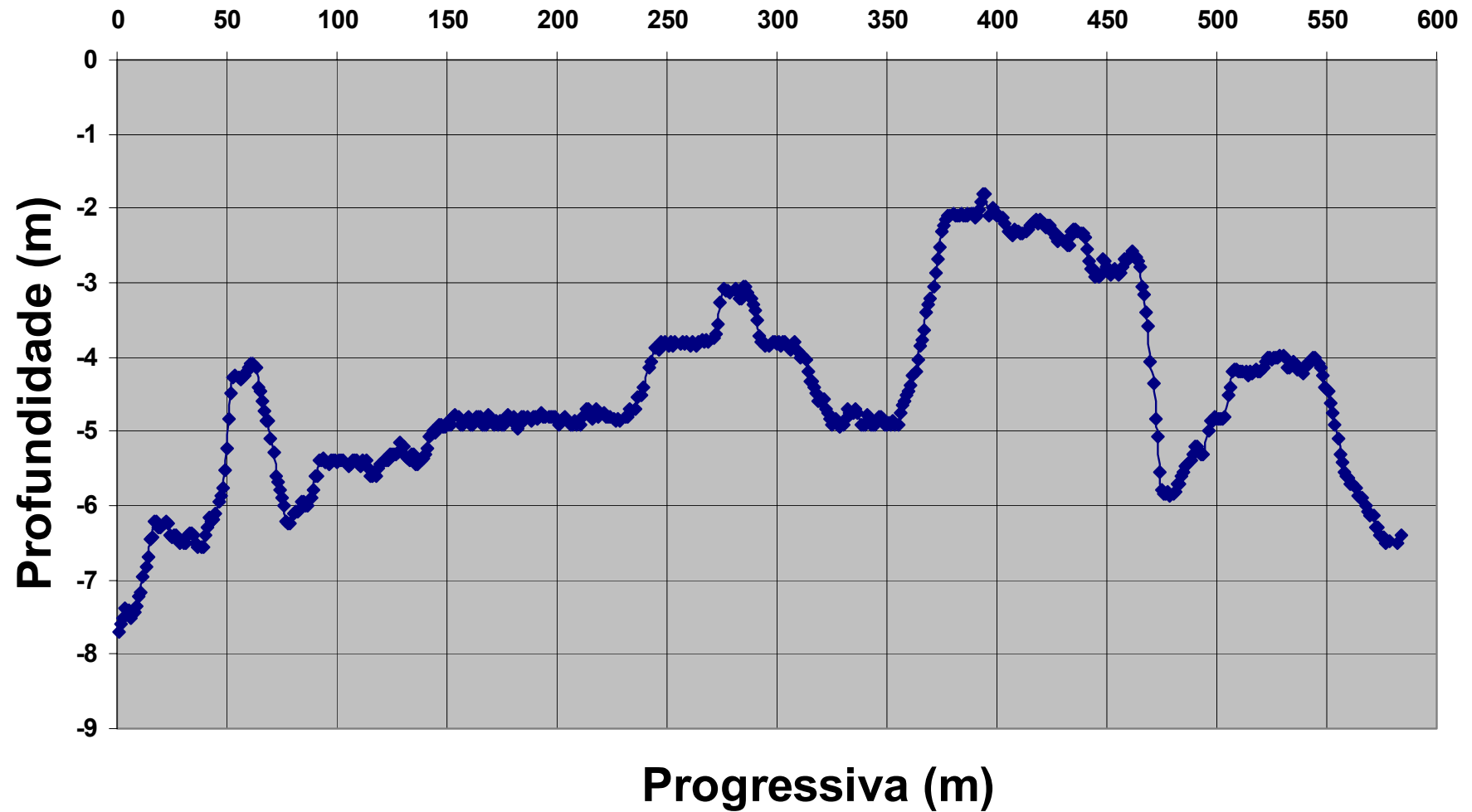
Seção Batimétrica L3 B



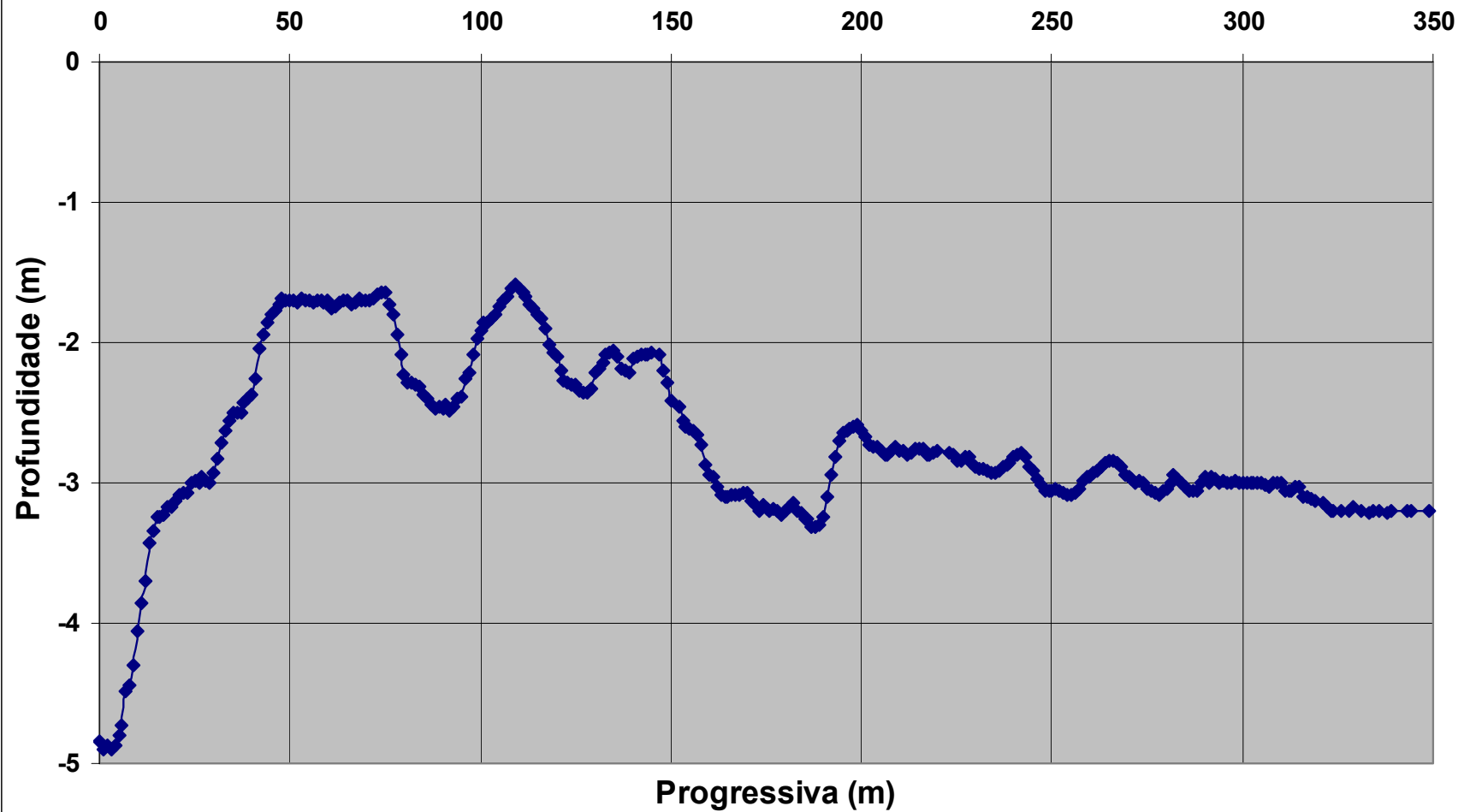
Seção Batimétrica L3 C



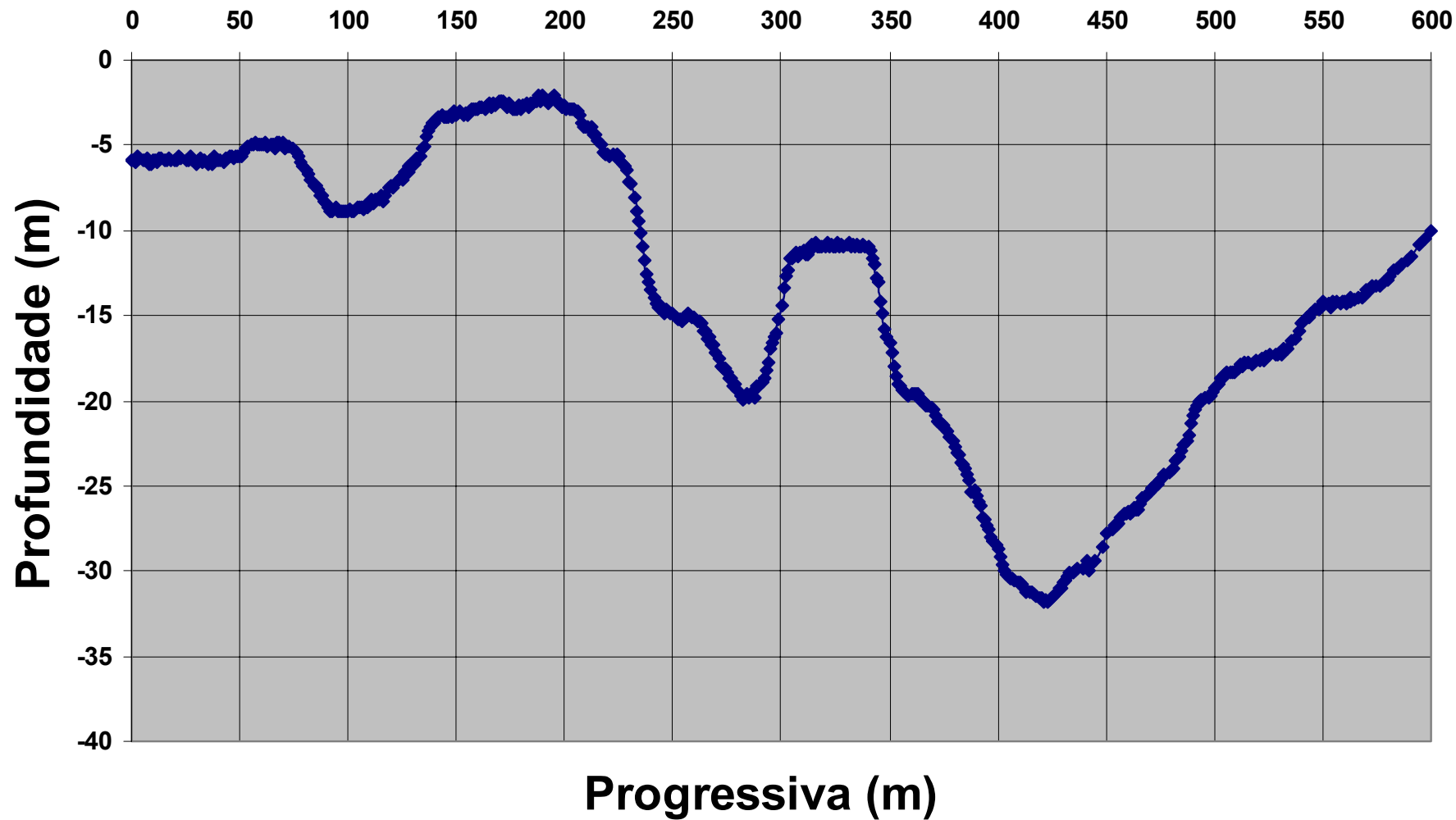
Seção Batimétrica L3D



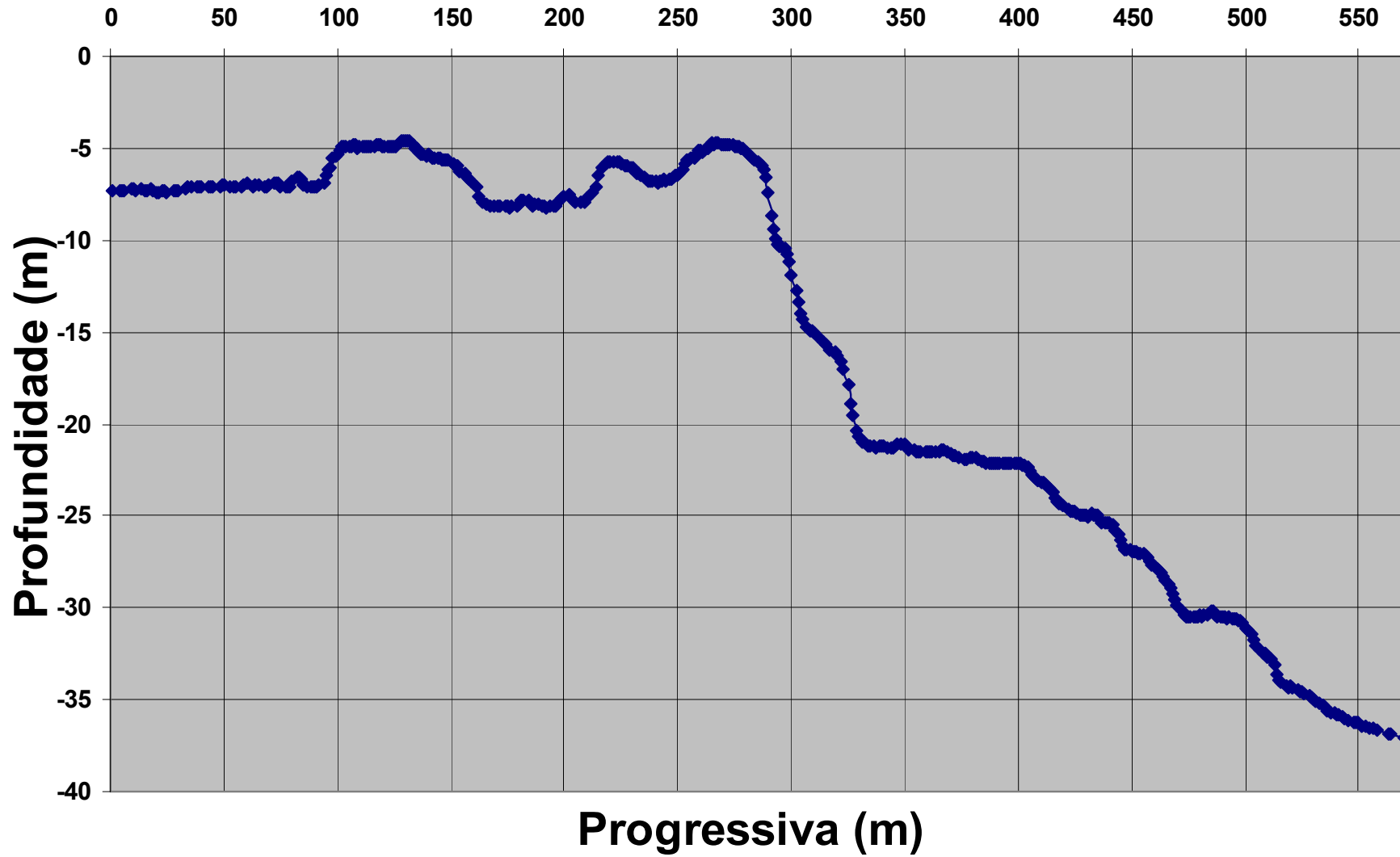
Seção Batimétrica L4/5 A



Seção Batimétrica L 4/5 B



Seção Batimétrica L4/5 C



Seção Batimétrica L 4/5 D

