

# **UHE SANTO ANTÔNIO**



**4ª ETAPA DO PROGRAMA DE LEVANTAMENTOS E  
MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO  
DO RIO MADEIRA E DO RESERVATÓRIO  
DA UHE SANTO ANTÔNIO**

**LEVANTAMENTO TOPOBATIMÉTRICO DO RIO MADEIRA  
PARA ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DO LEITO  
JUSANTE DA UHE SANTO ANTÔNIO**

**PJ0955-X-H41-GR-RL-0002-0A**

**MARÇO/2015**

---

## UHE SANTO ANTÔNIO

### 4ª ETAPA DO PROGRAMA DE LEVANTAMENTOS E MONITORAMENTO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO DO RIO MADEIRA E DO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO

### LEVANTAMENTO TOPOBATIMÉTRICO DO RIO MADEIRA PARA ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DO LEITOA JUSANTE DA UHE SANTO ANTÔNIO

PJ0955-X-H41-GR-RL-0002-0A

MARÇO/2015

| REV. | DATA       | DESCRIÇÃO       | ELAB.   | VISTO | APROV. |
|------|------------|-----------------|---------|-------|--------|
| 0    | 02/03/2015 | EMISSÃO INICIAL | MGS/MAS | MAS   | EFM    |

## ÍNDICE

| <i>Item</i> | <i>Assunto</i>  | <i>Página</i> |
|-------------|---|---------------|
| 1.          | CONSIDERAÇÕES INICIAIS  | 02            |
| 2.          | METODOLOGIAS EMPREGADAS DURANTE OS LEVANTAMENTOS DE CAMPO                                   | 06            |
| 2.1.        | LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO  | 07            |
| 2.2.        | INSTALAÇÃO DE MARCOS TOPOGRÁFICOS   | 08            |
| 2.3.        | LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO  | 10            |
| 2.4.        | PROCESSAMENTO DAS SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS   | 11            |
| 3.          | LEVANTAMENTO TOPOBATIMÉTRICO DE SEÇÕES NO TRECHO A JUSANTE DA UHE SANTO ANTÔNIO ATÉ HUMAITÁ | 12            |
| 3.1.        | INTRODUÇÃO  | 13            |
| 3.2.        | SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS   | 16            |
| 3.3.        | CONSIDERAÇÕES FINAIS ACERCA DAS SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS                                     | 65            |
| 4.          | ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL DO LEITO PARA ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO                 | 76            |
| 4.1.        | INTRODUÇÃO  | 77            |
| 4.2.        | AMOSTRAGEM DE SEDIMENTOS DO LEITO   | 77            |
| 4.3.        | PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM  | 78            |
| 4.4.        | DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL DO LEITO  | 79            |
| 4.5.        | RESULTADOS  | 79            |
|             | ANEXO I   | 97            |

## **1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**



**4ª Etapa do Programa de Levantamentos e Monitoramento Hidrossedimentológico do Rio Madeira e do Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

Durante a 1ª Etapa do Programa de Levantamentos e Monitoramento Hidrossedimentológico do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio, foi realizado o levantamento de seções transversais no rio Madeira, tanto na área do reservatório como a jusante. Estas medições serviram de base aos estudos de remanso causado pelo reservatório e à modelagem matemática do transporte de sedimentos unidimensional, na situação em condições naturais e com reservatórios. Esse levantamento complementou aquele realizado anteriormente por Eletrobrás FURNAS, durante a fase de Estudos de Viabilidade.

Na 2ª Etapa do Programa foi realizado o levantamento de 40 seções transversais antes do enchimento do reservatório, durante os meses de maio e junho de 2011. Determinou-se, então, um marco inicial para o acompanhamento da evolução do leito, fornecendo assim uma ferramenta com a capacidade de avaliar, preliminarmente, a morfodinâmica do leito do rio Madeira. Os resultados deste monitoramento foram disponibilizados no Relatório PJ0777-X-H41-GR-RL-0006-0A – “Levantamento Topobatimétrico do Rio Madeira para Acompanhamento da Evolução do Leito – R6”, emitido em Agosto de 2011.

No âmbito da 3ª Etapa do Programa foram realizados levantamentos batimétricos durante os anos 2012 e 2013, gerando como resultado o relatório “Levantamento Topobatimétrico do Rio Madeira para Acompanhamento da Evolução do Leito – R1/R4” - PJ0865-X-H41-GR-RL-0001-1A, emitido em novembro de 2012, e o relatório “Levantamento Topobatimétrico do Rio Madeira para Acompanhamento da Evolução do Leito – R7/R9” - PJ0865-X-H41-GR-RL-0005-0A, emitido em março de 2014. Nestes relatórios foram apresentados os levantamentos batimétricos e de granulometria das seções transversais e os resultados relativos à evolução do leito do rio Madeira no trecho do reservatório e a jusante da UHE Santo Antônio.

Em 01 de maio de 2014, foi celebrado o Contrato CT.DS.251.2014, de Prestação de Serviços entre a Santo Antônio Energia S.A. e a PCE Projetos e Consultorias de Engenharia Ltda. o qual têm por objetivo a prestação de serviços para a 4ª Etapa do Programa de Levantamentos e de Monitoramento Hidrossedimentológico do Rio Madeira e do Reservatório da UHE Santo Antônio.

Este contrato estabelece, conforme descrito no Escopo Detalhado (Anexo 1), no item relativo à Meta IV - Levantamento Topobatimétrico e Coleta de Material do Leito para Análise Granulométrica, a seguinte atividade:

*Atividade IV.4 Levantamentos topobatimétricos e de granulometria para acompanhamento da evolução do leito do reservatório da UHE Santo Antônio e do rio Madeira a jusante da usina, após a construção dos reservatórios, compreendendo:*

- *Levantamentos de seções topobatimétricas, conforme apresentado na Tabela 3.5., que indica a quantidade de seções para levantamento em cada trecho de interesse;*
- *Coleta e análise granulométrica de material do leito em todas as seções topobatimétricas levantadas, em, pelo menos, 1 (uma) vertical por seção.*

**4ª Etapa do Programa de Levantamentos e Monitoramento Hidrossedimentológico do Rio Madeira e do Reservatório da UHE Santo Antônio**

**Tabela 3.5.**  
**Monitoramento de Seções Topobatimétricas e de Granulometria do Leito para o Acompanhamento da Evolução do Leito**

| <b>TRECHO</b>                        | <b>Nº DE SEÇÕES</b> | <b>Nº DE AMOSTRAS PARA GRANULOMETRIA DO LEITO</b> |
|--------------------------------------|---------------------|---|
| <i>Reservatório de Santo Antônio</i> | 20                  | 20  |
| <i>UHE Santo Antônio até Humaitá</i> | 20                  | 20  |
| <i>Total</i>                         | 40                  | 40  |

Observações: a) as seções a serem levantadas deverão, a princípio, coincidir com as levantadas para suporte à modelagem.  
ii) as seções deverão ser levantadas com frequência anual, a partir do ano do enchimento do reservatório, no período de maio a agosto (após a cheia).

Em atendimento a este contrato, o relatório PJ0955-X-H41-GR-RL-0001-0B, emitido em dezembro de 2014, apresentou o acompanhamento da evolução do leito do rio Madeira no reservatório da UHE Santo Antônio, descrevendo os serviços de campo realizados em junho/julho de 2014

Adicionalmente, durante um Seminário Técnico ocorrido em outubro de 2013, no qual foi discutido o monitoramento sedimentológico do rio Madeira, o IBAMA sugeriu a ampliação do número de seções topobatimétricas monitoradas imediatamente a jusante do reservatório. Por este motivo, foram incorporadas mais 3 seções (ST 250,8, ST 253,0 e ST 254,0) ao levantamento anual de seções.

O objetivo principal do presente relatório consiste no acompanhamento da evolução do leito do rio Madeira a jusante da UHE Santo Antônio mediante a comparação dos perfis transversais das seções em diferentes marcos temporais. Neste contexto, se destaca que as 23 seções localizadas a jusante da barragem da UHE Santo Antônio, até cidade de Humaitá, estão distribuídas de forma relativamente uniforme ao longo do trecho, descontando a concentração de batimetrias solicitada pelo IBAMA nas imediações de Porto Velho.

Este relatório está estruturado da seguinte forma: o item 2 apresenta os procedimentos metodológicos empregados durante o levantamento das seções e, posteriormente, o item 3 apresenta o desenho de cada uma das seções batimétricas levantadas no trecho a jusante da UHE Santo Antônio (trecho UHE Santo Antônio até a Humaitá).

Por último, no item 4 são descritos os procedimentos metodológicos de coleta e análise das amostras de sedimento do leito, além dos resultados destas análises granulométricas.

O serviço de coleta de amostras foi realizado durante os meses de junho e julho de 2014, e ficou restrito às 20 seções transversais originais do rio Madeira utilizadas para o acompanhamento da evolução do leito a jusante.

O presente relatório traz todas as informações mencionadas nos parágrafos anteriores, acrescentando os levantamentos batimétricos e granulométricos efetuados em 2009, 2011, 2012 e 2013. As metodologias e procedimentos utilizados nos levantamentos e nas

**4ª Etapa do Programa de Levantamentos e Monitoramento Hidrossedimentológico  
do Rio Madeira e do Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

análises estão novamente descritas neste relatório, de forma a torná-lo independente dos anteriores. As considerações finais acerca das seções topobatimétricas e os resultados das análises granulométricas foram atualizados em função das novas informações incorporadas.

## **2. METODOLOGIAS EMPREGADAS DURANTE OS LEVANTAMENTOS DE CAMPO**

As metodologias empregadas nos levantamentos topobatimétricos das seções transversais consistiram, basicamente, de duas etapas: (i) levantamento topográfico das margens para determinação do nível d'água; e (ii) levantamento batimétrico da calha fluvial.

## 2.1. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

A localização das seções transversais e, particularmente, a determinação das coordenadas planimétricas para apoio à topobatimetria foi realizada a partir de equipamentos GPS da marca GARMIN, modelo MAP 76S e modelo 76 (Figura 2.1).

O levantamento topográfico das margens foi executado, entre o marco de referência da seção e o nível de água no local, mediante nivelamento geométrico, com o uso de nível da marca SOKKIA, modelo C24 e mira (Figura 2.2).

**Figura 2.1.**  
**Localização das Seções Transversais**



**Figura 2.2.**  
**Nivelamento das Margens entre o Marco de Referência e o Nível d'Água**



As coordenadas horizontais utilizadas estão referidas ao sistema WGS84 (*World Geodetic System 1984*). Destaca-se que o levantamento de campo foi realizado durante o período de transição entre o referencial geodésico SAD69 e SIRGAS2000 (2005 a 2015). Dado que os equipamentos GPS utilizados ainda carecem deste novo referencial, adotou-se o *datum* WGS84, que fornece um resultado muito próximo em relação ao SIRGAS2000.



## **2.2. INSTALAÇÃO DE MARCOS TOPOGRÁFICOS**

Considerando a necessidade do desenvolvimento de serviços topográficos ao longo das margens do rio Madeira, as seções definidas para os levantamentos topobatimétricos foram materializadas através de marcos topográficos implantados nas margens de cada seção. No item 3 deste relatório detalha-se a localização destes marcos para o trecho compreendido entre a UHE Santo Antônio e a localidade de Humaitá.

Cabe destacar que cada seção já apresentava marcos em uma ou nas duas margens, que foram implantados por FURNAS / CNO – em 2006, durante a etapa de Viabilidade, ou pela empresa MicroARS – em 2009, durante o desenvolvimento do Projeto Executivo (Figura 2.3). Posteriormente, durante os levantamentos topobatimétricos realizados em cada seção transversal pela PCE em 2011, 2012 ou 2013, procedeu-se à limpeza do terreno com o intuito de localizar os marcos preexistentes. Na maioria dos locais, o resultado foi infrutífero devido à pequena exposição do marco acima da superfície do terreno, à densa cobertura vegetal da mata amazônica (Figura 2.4) e ao tempo transcorrido desde a instalação inicial.

Adicionalmente, após a excepcional cheia de 2014 verificou-se que a maior parte dos marcos das seções transversais a jusante do reservatório tinham sido soterrados com volumes expressivos de sedimentos. Assim, durante os levantamentos de campo realizados em 2014 procedeu-se à re-instalação de marcos em cada uma das margens da seção. Fisicamente, os marcos são de concreto, de forma trapezoidal e 0,5m de altura. Sua base foi concretada em um buraco escavado em solo, deixando o marco entre 0,2m a 0,3m acima do nível do terreno, identificado com uma calota (com pino) fundida em alumínio (Figura 2.5).

Em relação ao referenciamento altimétrico, os marcos implantados por FURNAS/CNO tiveram como referência a rede altimétrica do IBGE (nivelamento geométrico e com GPS geodésico com mono frequência dos RN's oficiais). Aqueles implantados pela MicroARS tiveram como referência a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo - RBMC/IBGE (GPS geodésico com dupla frequência L1/L2). Neste relatório, todos os marcos estão referenciados ao ajuste altimétrico do IBGE de outubro de 2009.

**Figura 2.3.**  
**Exemplos dos Marcos Implantados por FURNAS e pela MicroARS**



**Figura 2.4.**  
**Marcos Implantados pela MicroARS nas seções ST 288,8 e ST 318,8**



**Figura 2.5.**  
**Exemplo do Marco Implantado pela PCE na Seção ST 129,8**





### 2.3. LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

O trecho de rio submerso da seção transversal foi levantado com o uso de ecobatímetro e o posicionamento geográfico com GPS. A partir das coordenadas planimétricas que definem as seções topobatimétricas planejadas para os levantamentos da área de pesquisa no rio Madeira, foi realizada uma digitalização destes pontos, servindo de base para realizar a navegação destas seções.

Os levantamentos batimétricos foram realizados com o auxílio de um sistema de bordo computadorizado, que permite a automação na coleta de dados batimétricos interligado ao sistema de posicionamento. Esta sinergia facilita a orientação visual da navegação sobre as seções previamente programadas.

O software de interface de dados utilizado nesse trabalho denomina-se Hypack® (Hydrographic Survey Software). O Hypack® é um programa desenvolvido especificamente para levantamentos batimétricos, que permite projetar a campanha, coletar dados, processar e reduzi-los, e gerar os produtos finais.

As profundidades foram medidas com ecobatímetro digital de alta resolução Bathy500 MF, da SyQwest Incorporated, de registro contínuo, frequência de 200 kHz e precisão melhor do que 5 (cinco) centímetros, o qual possui interface para aquisição e gravação automática dos dados em computador.

O posicionamento da embarcação durante o levantamento foi realizado com o GPS Crescent, modelo R-130 (Hemisphere GPS), com recepção de sinal diferencial XP fornecido pelo sistema OMNISTAR de satélite geoestacionário, obtendo-se coordenadas planimétricas com precisão esperada de  $\pm 15$  cm. Ressalta-se, novamente, que as coordenadas das posições sondadas foram determinadas no sistema UTM – Datum WGS84, Meridiano Central 63°W.

A disposição destes equipamentos na embarcação se observa na Figura 2.6.

**Figura 2.6.**  
**Disposição dos Equipamentos no Barco**



Com as batimetrias finalizadas, as profundidades medidas em cada ponto da seção transversal são subtraídas do valor do nível d'água (NA) determinado em cada local mediante um procedimento alternativo (leitura de réguas próximas ou interpolação de NAs), devido à falta de marcos com referência altimétrica. Este procedimento permitiu a



obtenção das cotas do perfil do leito da seção transversal relativo ao Nível de Referência adotado para os levantamentos.

#### 2.4. PROCESSAMENTO DAS SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS

Os registros das profundidades adquiridos durante as medições foram posteriormente revisados para correção e extração de feições espúrias. O levantamento das seções com o auxílio do *softwareHypack*<sup>®</sup> permitiu a geração de arquivos com a sequência Coordenada UTM (Este), Coordenada UTM (Norte), Desvio Lateral (em relação à seção programada), Profundidade e Distância Percorrida.

Ressalta-se que, quando o levantamento batimétrico é realizado com o *softwareHypack*<sup>®</sup>, as coordenadas UTM de saída são referidas ao *datum*World Geodetic System 1984 (WGS84), o qual é compatível com o sistema SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) ao nível de poucos centímetros. Ainda cabe aclarar que, segundo consta no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), desde o estabelecimento do sistema GPS (Global Positioning System), o seu Sistema Geodésico de Referência é o WGS84, e não existem parâmetros de transformação entre SIRGAS2000 e WGS84 porque eles são praticamente iguais, ou seja,  $DX = 0$ ,  $DY = 0$  e  $DZ = 0$ .

Desta forma, de posse dos dados da posição do ponto levantado (Este, Norte) e a profundidade (cota), foi possível desenhar as seções topobatimétricas com o auxílio do programa Excel (Microsoft Office<sup>®</sup>). Assim como as réguas e os marcos, todos os registros batimétricos encontram-se referenciados ao ajuste altimétrico do IBGE de outubro de 2009.

### **3. LEVANTAMENTO TOPOBATIMÉTRICO DE SEÇÕES NO TRECHO A JUSANTE DAUHE SANTO ANTÔNIO**

### 3.1. INTRODUÇÃO

O trecho localizado a jusante da UHE Santo Antônio até a cidade de Humaitá compreende 259 quilômetros do rio Madeira, no qual, em anos anteriores, foram realizados levantamentos topobatimétricos em 20 seções transversais. Conforme já informado, em atendimento à solicitação do IBAMA, a partir do levantamento de 2013 foram inseridas três novas seções (ST 250,8, ST 253,0 e ST 254,0), com o intuito de monitorar as variações morfológicas no trecho imediatamente a jusante da usina.

Destaca-se que em 2013 não foi possível a realização do levantamento da seção ST 257,0 – seção mais próxima à barragem, devido às oscilações do nível d'água na seção que comprometiam a segurança da equipe. Assim, foi levantada uma nova seção (ST256,8), um pouco mais a jusante. Em 2014, as condições do escoamento permitiram a navegação naquela seção, de modo que não houve necessidade de levantar a ST 256,8. Porém, esta será aqui apresentada para auxiliar a compreensão das alterações morfológicas das seções a jusante da barragem.

A localização geral destas seções topobatimétricas se observa na Figura 3.1, enquanto que as coordenadas de cada margem da seção transversal apresentam-se na Tabela 3.1., no sistema UTM – Universal Transverse Mercator (*Datum* WGS 1984).

O desenho PJ0955-Z-H41-GR-DE-0001-R0A – “Localização das Seções Topobatimétricas para Acompanhamento da Evolução do Leito”, disponível no ANEXO I, apresenta também a localização destas seções com as respectivas coordenadas UTM (*datum* WGS84).

Conforme citado anteriormente, na maior parte das seções situadas a jusante da UHE Santo Antônio não foi possível achar um marco com referência altimétrica, o que obrigou a adotar um procedimento alternativo na determinação do nível d'água, como por exemplo:

- ✓ leitura de régua quando a seção coincidia com uma estação fluviométrica;
- ✓ interpolação do nível d'água entre dois pontos com cotas do NA conhecidas;
- ✓ extrapolação do nível d'água (para jusante ou montante) a partir de dois pontos com cotas do NA conhecidas.

A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos critérios utilizados na obtenção do nível d'água em cada seção.



**Tabela 3.1.**  
**Seções Topobatimétricas no Trecho a Jusante da UHE Santo Antônio até Humaitá**

| Nome da Seção<br>(km) | Margem Direita |          | Margem Esquerda |          |
|-----------------------|----------------|----------|-----------------|----------|
|                       | Norte (m)      | Este (m) | Note (m)        | Este (m) |
| ST 0,0                | 9.173.982      | 498.279  | 9.173.930       | 497.175  |
| ST 31,1               | 9.147.052      | 508.057  | 9.147.746       | 507.097  |
| ST 51,6               | 9.130.538      | 512.198  | 9.129.680       | 510.514  |
| ST 68,2               | 9.114.395      | 514.003  | 9.114.628       | 513.116  |
| ST 76,3               | 9.108.775      | 508.347  | 9.109.969       | 507.624  |
| ST 101,3              | 9.094.601      | 490.376  | 9.095.784       | 490.028  |
| ST 113,8              | 9.090.919      | 478.414  | 9.091.746       | 478.143  |
| ST 129,8              | 9.095.957      | 464.795  | 9.097.184       | 464.395  |
| ST 146,3              | 9.082.519      | 458.005  | 9.083.633       | 456.552  |
| ST 157,1              | 9.072.778      | 453.809  | 9.073.519       | 452.631  |
| ST 165,8              | 9.067.298      | 446.812  | 9.068.187       | 446.345  |
| ST 190,6              | 9.052.547      | 441.570  | 9.052.188       | 440.813  |
| ST 201,6              | 9.048.955      | 433.469  | 9.050.077       | 434.191  |
| ST 219,2              | 9.050.679      | 418.599  | 9.051.703       | 418.190  |
| ST 230,2              | 9.045.835      | 409.007  | 9.047.076       | 407.969  |
| ST 242,6              | 9.041.558      | 399.408  | 9.041.856       | 398.472  |
| ST 250,8              | 9.033.577      | 398.945  | 9.033.468       | 398.252  |
| ST 251,9              | 9.032.429      | 399.314  | 9.032.447       | 398.377  |
| ST 253,0              | 9.031.494      | 399.545  | 9.031.363       | 398.616  |
| ST 254,0              | 9.030.179      | 399.886  | 9.030.513       | 398.548  |
| ST 255,1              | 9.029.048      | 399.268  | 9.029.779       | 398.111  |
| ST 256,0              | 9.028.116      | 398.918  | 9.029.100       | 397.772  |
| ST 256,8*             | 9.027.877      | 397.680  | 9.028.757       | 397.189  |
| ST 257,0              | 9.027.433      | 397.840  | 9.028.652       | 396.955  |

\*Seção não levantada em 2014.

**Tabela 3.2.**  
**Resumo dos Marcos Localizados no Trecho a Jusante da UHE Santo Antônio e dos Critérios Utilizados na Determinação do Nível d'Água em Cada Seção**

| Local  | Data       | NA    | Observação   |
|--------|------------|-------|--|
| 0,0    | 27/06/2014 | 45,17 | Leitura horária da régua Humaitá, considerando Cota Zero = 24,65 m           |
| 31,1   | 27/06/2014 | 46,25 | NA calculado pela declividade da linha d'água                                |
| 51,6   | 27/06/2014 | 47,10 | NA calculado pela declividade da linha d'água                                |
| 68,2   | 26/06/2014 | 48,06 | Leitura de régua de Calama, considerando Cota Zero = 30,26m                  |
| 76,3   | 26/06/2014 | 48,32 | NA calculado pela declividade da linha d'água                                |
| 101,3  | 26/06/2014 | 49,37 | Leitura horária da régua Papagaio, considerando Cota Zero = 29,67m           |
| 113,8  | 26/06/2014 | 50,09 | NA calculado pela declividade da linha d'água                                |
| 129,8  | 26/06/2014 | 51,06 | Leitura horária Nazaré, considerando Cota Zero = 33,07m                      |
| 146,3  | 25/06/2014 | 51,88 | NA calculado pela declividade da linha d'água                                |
| 157,1  | 25/06/2014 | 52,32 | NA calculado pela declividade da linha d'água                                |
| 165,8  | 25/06/2014 | 52,80 | Leitura horária São Carlos, considerando Cota Zero = 38,56m                  |
| 190,6  | 20/06/2014 | 53,90 | NA calculado pela declividade da linha d'água                                |
| 201,6  | 24/06/2014 | 54,45 | NA calculado pela declividade da linha d'água                                |
| 219,2  | 20/06/2014 | 56,16 | Leitura horária Cujubim, considerando Cota Zero = 42,04m                     |
| 230,2  | 15/07/2014 | 54,03 | NA calculado pela declividade da linha d'água                                |
| 242,6  | 15/07/2014 | 54,60 | NA calculado pela declividade da linha d'água                                |
| 250,8  | 16/06/2014 | 57,78 | Média Diária da leitura da régua Porto Velho, considerando Cota Zero = 43,00 |
| 251,9  | 16/06/2014 | 57,78 | Leitura horária da régua Porto Velho, considerando cota zero = 43,00         |
| 253,0  | 18/08/2014 | 50,46 | Média Diária da leitura da régua Porto Velho, considerando Cota Zero = 43,00 |
| 254,0  | 16/06/2014 | 58,07 | Média Diária da leitura da régua R7, considerando Cota Zero = 42,89          |
| 255,1  | 16/06/2014 | 58,07 | Leitura horária da régua R7, considerando cota zero = 42,89                  |
| 256,0  | 11/08/2014 | 50,91 | Leitura horária da régua R7, considerando cota zero = 42,89                  |
| 256,8* | ---        | ---   | ---  |
| 257,0  | 25/08/2014 | 49,77 | Média Diária da leitura da régua R7, considerando Cota Zero = 42,89          |

\*Seção não levantada em 2014

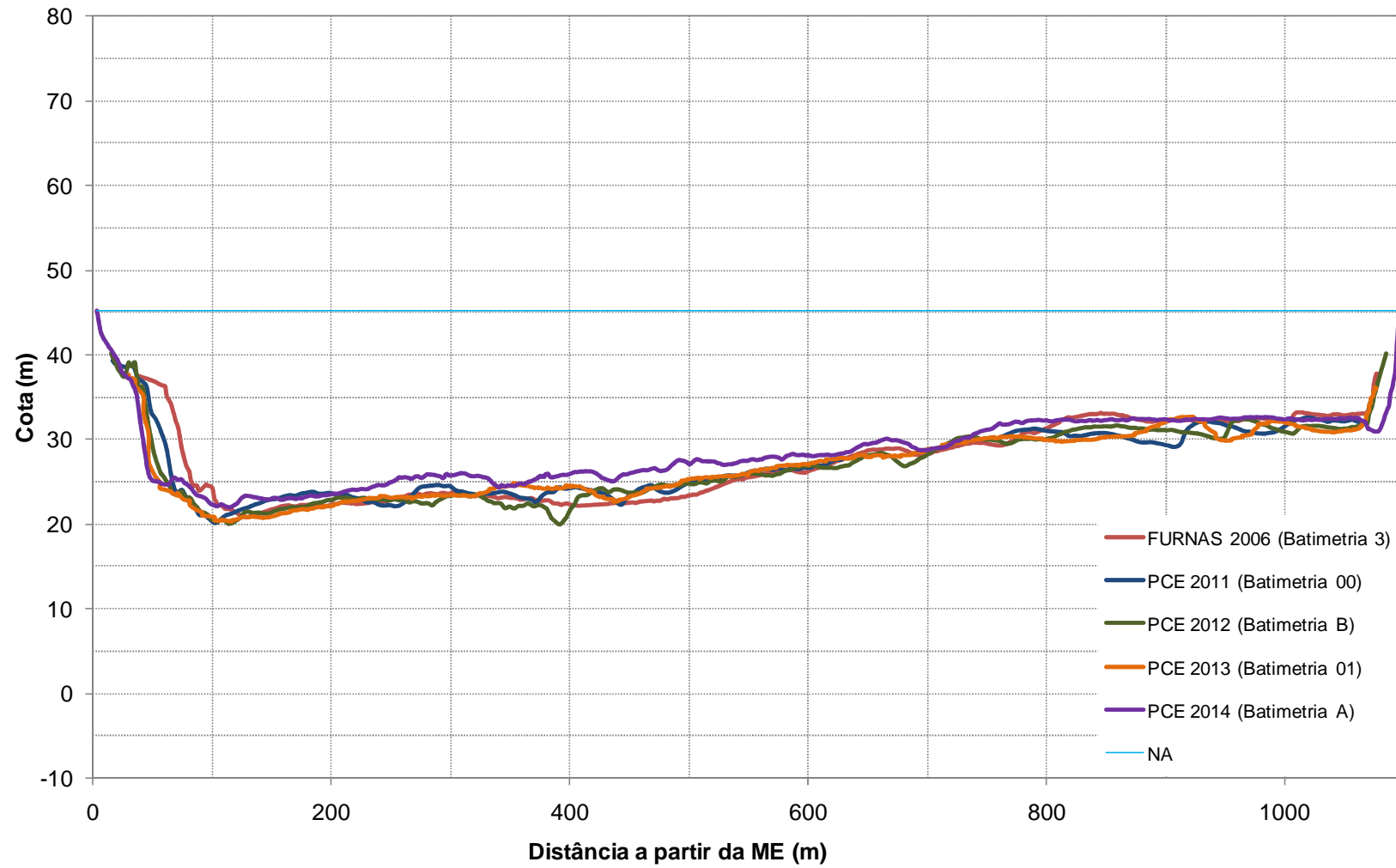
### 3.2. SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS

Apresentam-se a seguir os desenhos correspondentes às 23 seções topobatimétricas levantadas no trecho a jusante da UHE Santo Antônio – trecho entre a barragem da UHE Santo Antônio até a localidade de Humaitá. Cada local apresenta, sequencialmente, a seção topobatimétrica e a vista em planta da trajetória da embarcação para as travessias correspondentes ao levantamento atual e aos pretéritos.

Destaca-se que em cada local de medição, além do levantamento de 2014, já foi realizada a superposição das medições topobatimétricas pretéritas, sejam de FURNAS (2006) ou da MicroARS (2009), e da PCE (2011, 2012 e 2013). Em cada local foram realizadas 3 travessias (levantamentos), entretanto no gráfico apresenta-se apenas 1 travessia para cada ano, de modo a simplificar a compreensão da mesma. Posteriormente serão discutidas, caso a caso, as possíveis diferenças entre os levantamentos e suas causas.

Nas figuras correspondentes às batimetrias, utilizou-se como critério colocar o início do levantamento coincidente com o marco da margem esquerda (Ponto Inicial PI=0m). Em relação às figuras com o desenho das trajetórias da embarcação durante os levantamentos, cabe esclarecer que os dados da MicroARS estavam em coordenadas UTM (*datum* SIRGAS2000) e os dados de FURNAS em coordenadas UTM (*datum* SAD69). Assim, utilizou-se o *software* ProGrid (IBGE) para realizar esta transformação de coordenadas do *datum* SAD69 para SIRGAS2000.

Figura 3.2.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 0,0





**Figura 3.3.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 0,0**

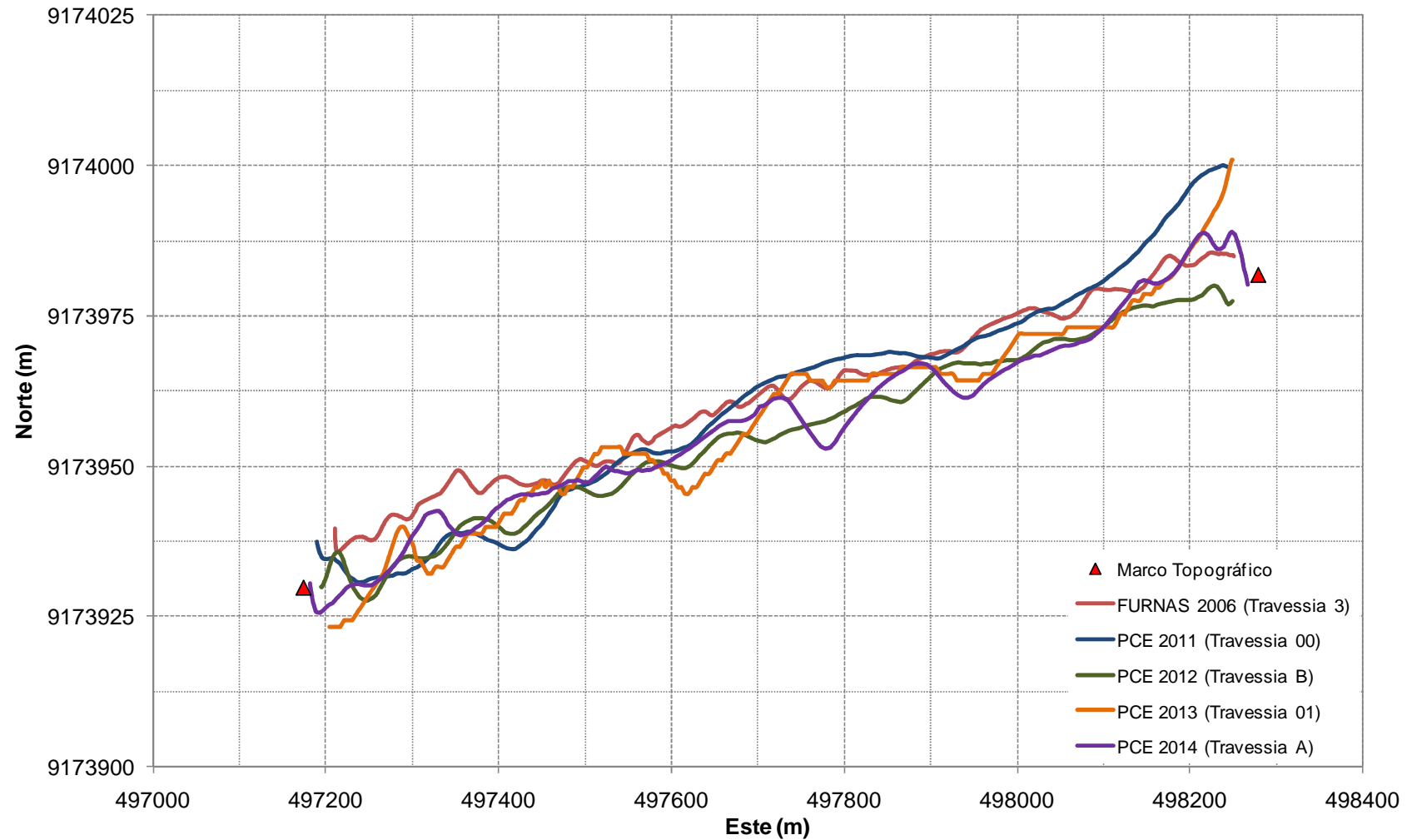
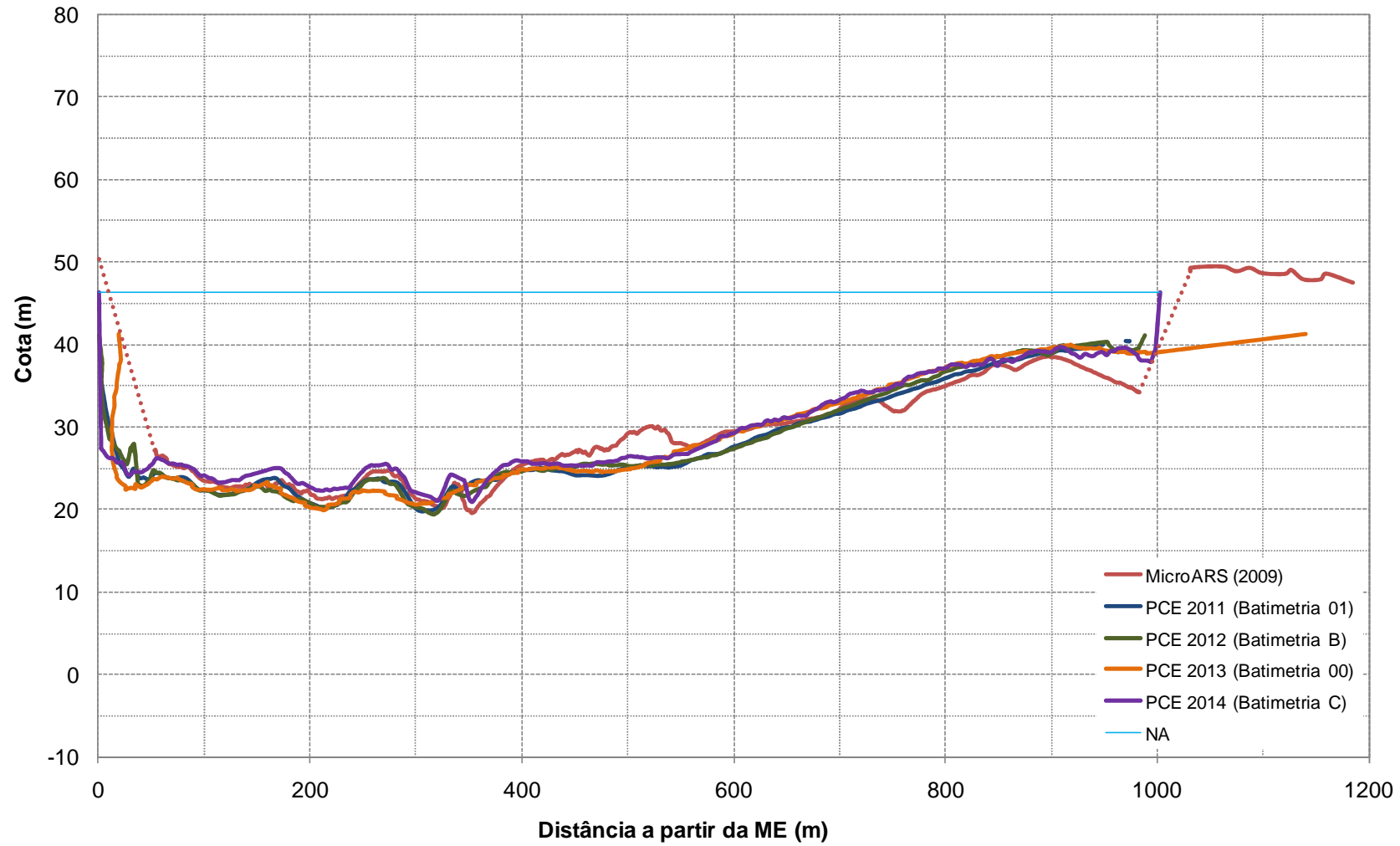




Figura 3.4.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 31,1



**Figura 3.5.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 31,1**

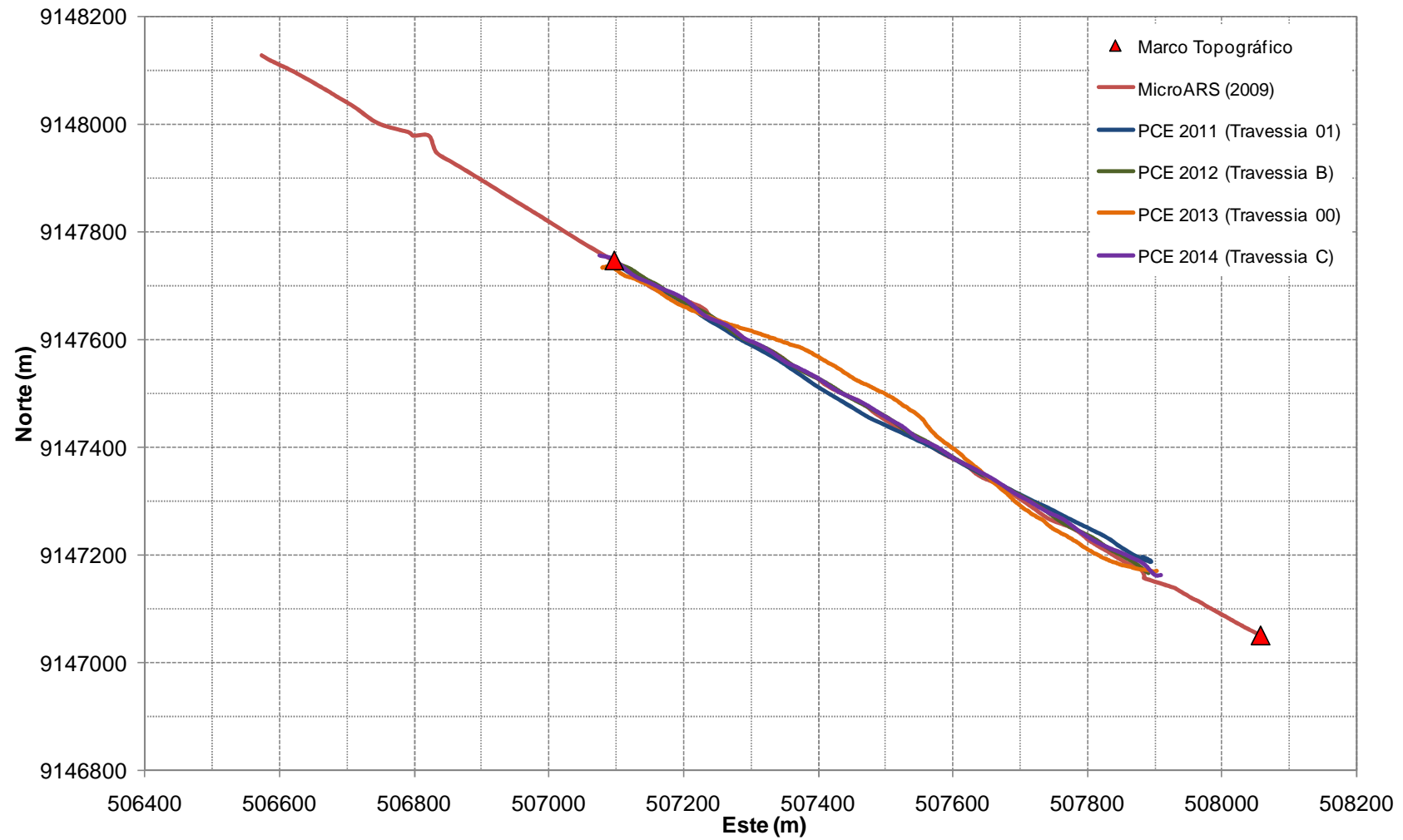
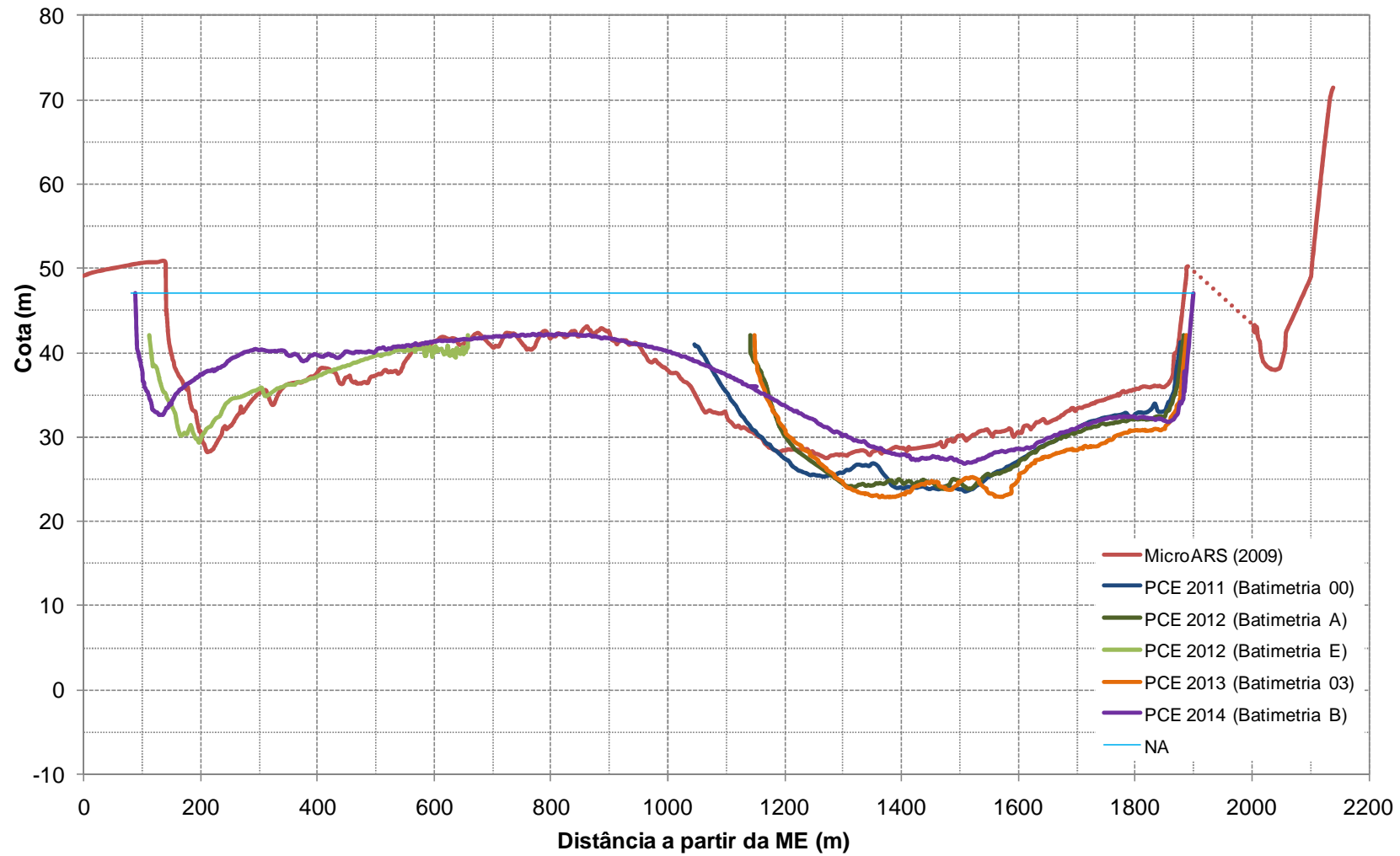
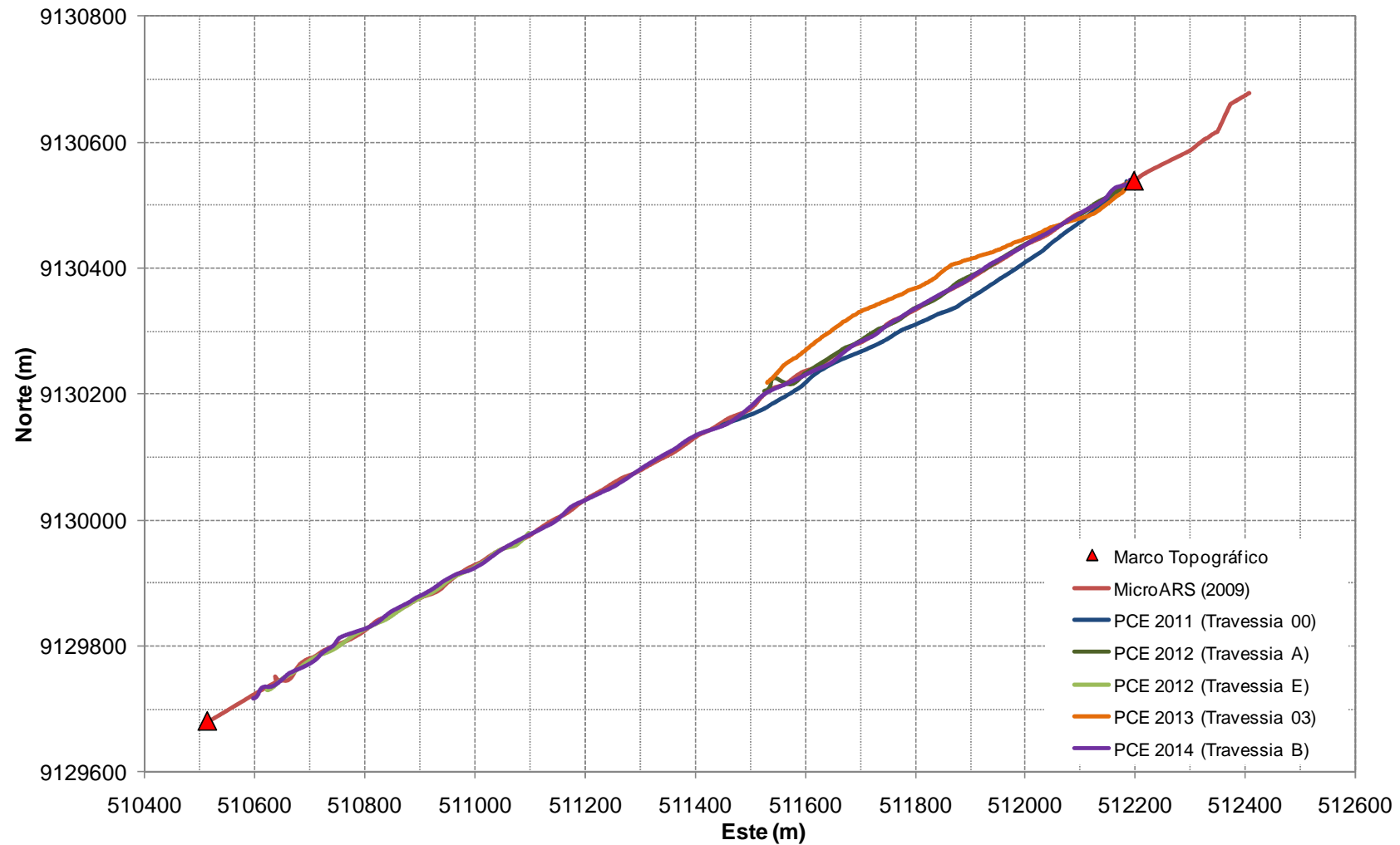


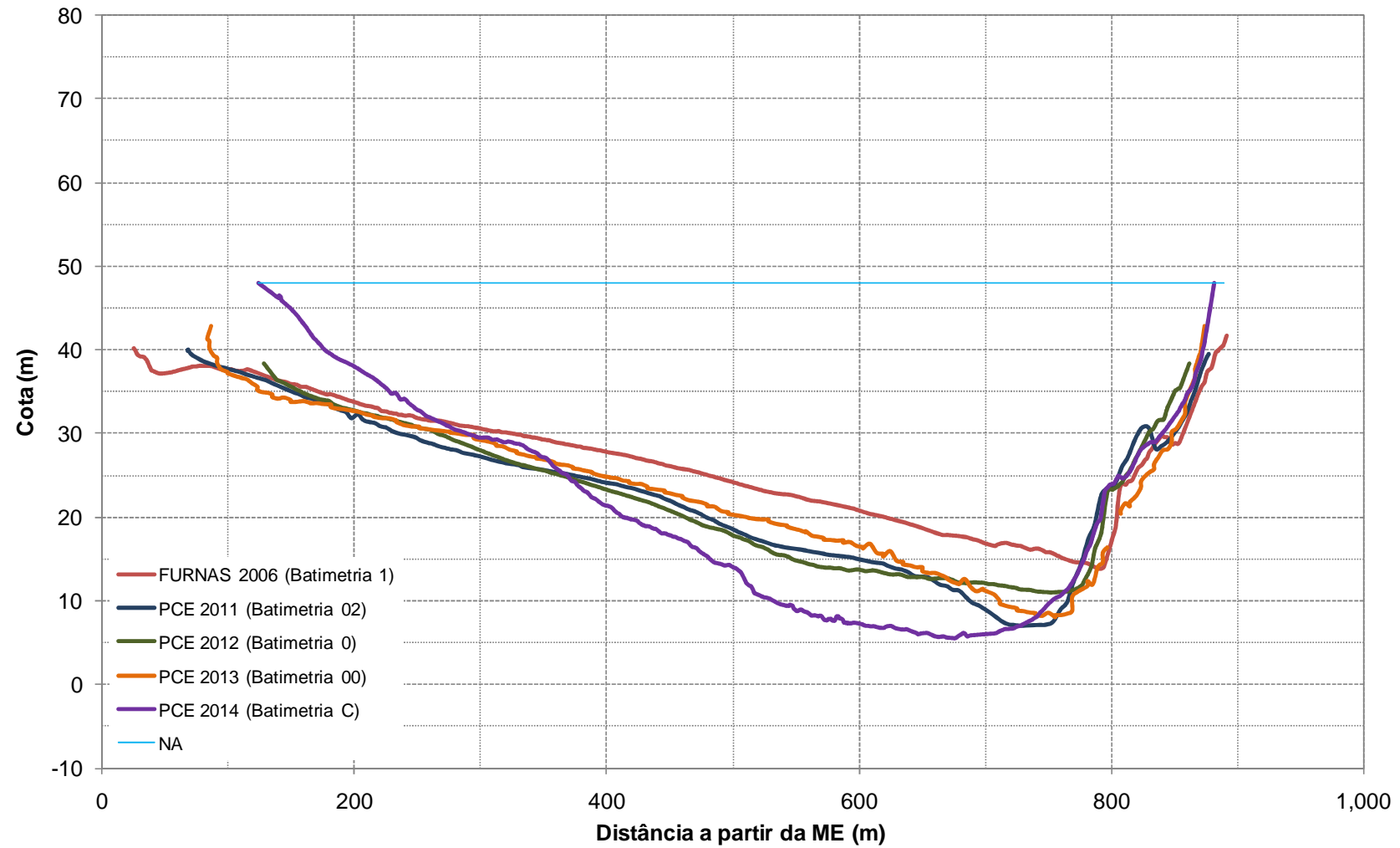
Figura 3.6.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 51,6



**Figura 3.7.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 51,6**



**Figura 3.8.**  
**Perfil Topobatimétrico da Seção ST 68,2**



**Figura 3.9.**  
**Trajétoria da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 68,2**

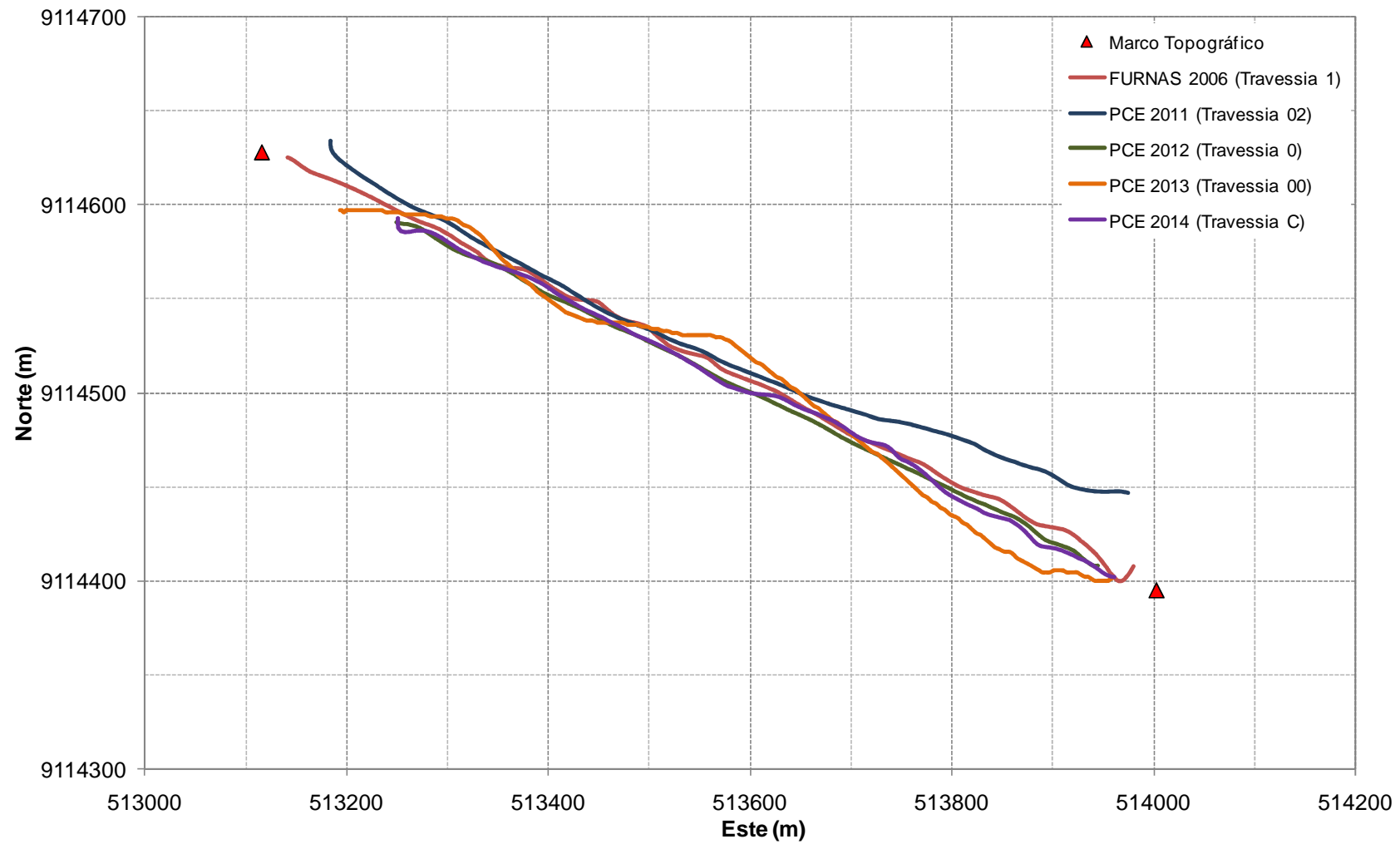
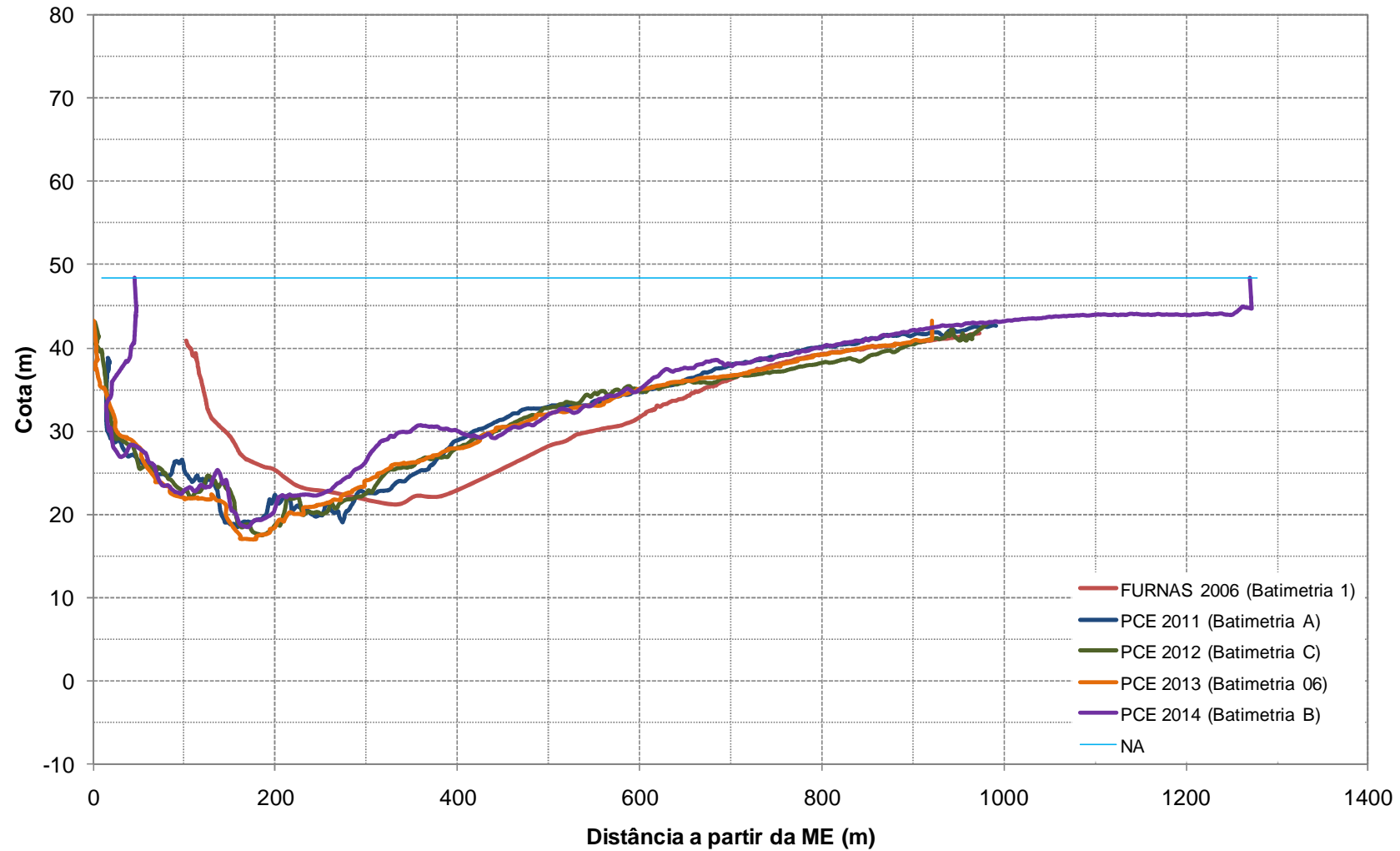


Figura 3.10.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 76,3



**Figura 3.11.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 76,3**

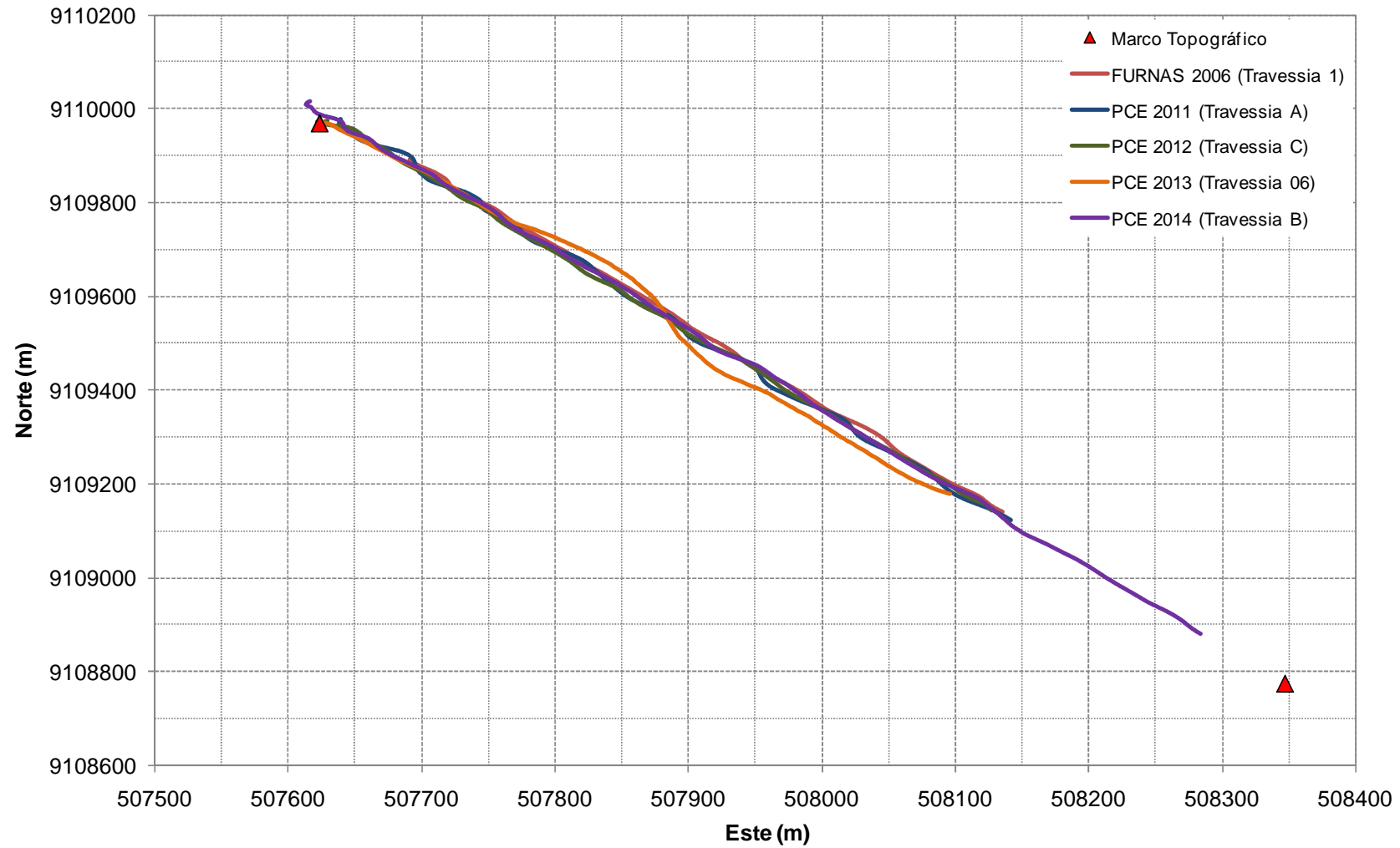
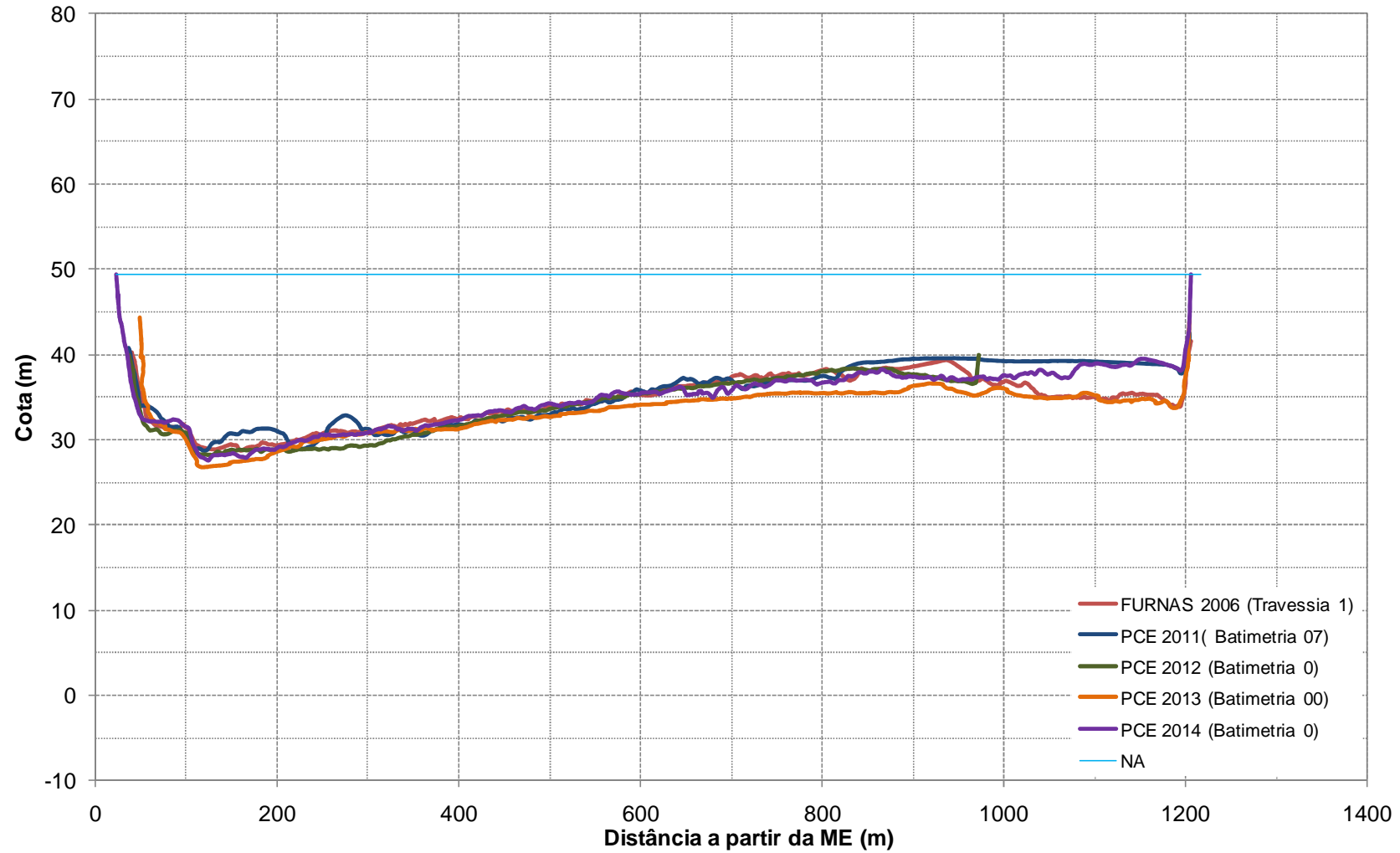




Figura 3.12.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 101,3



**Figura 3.13.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 101,3**

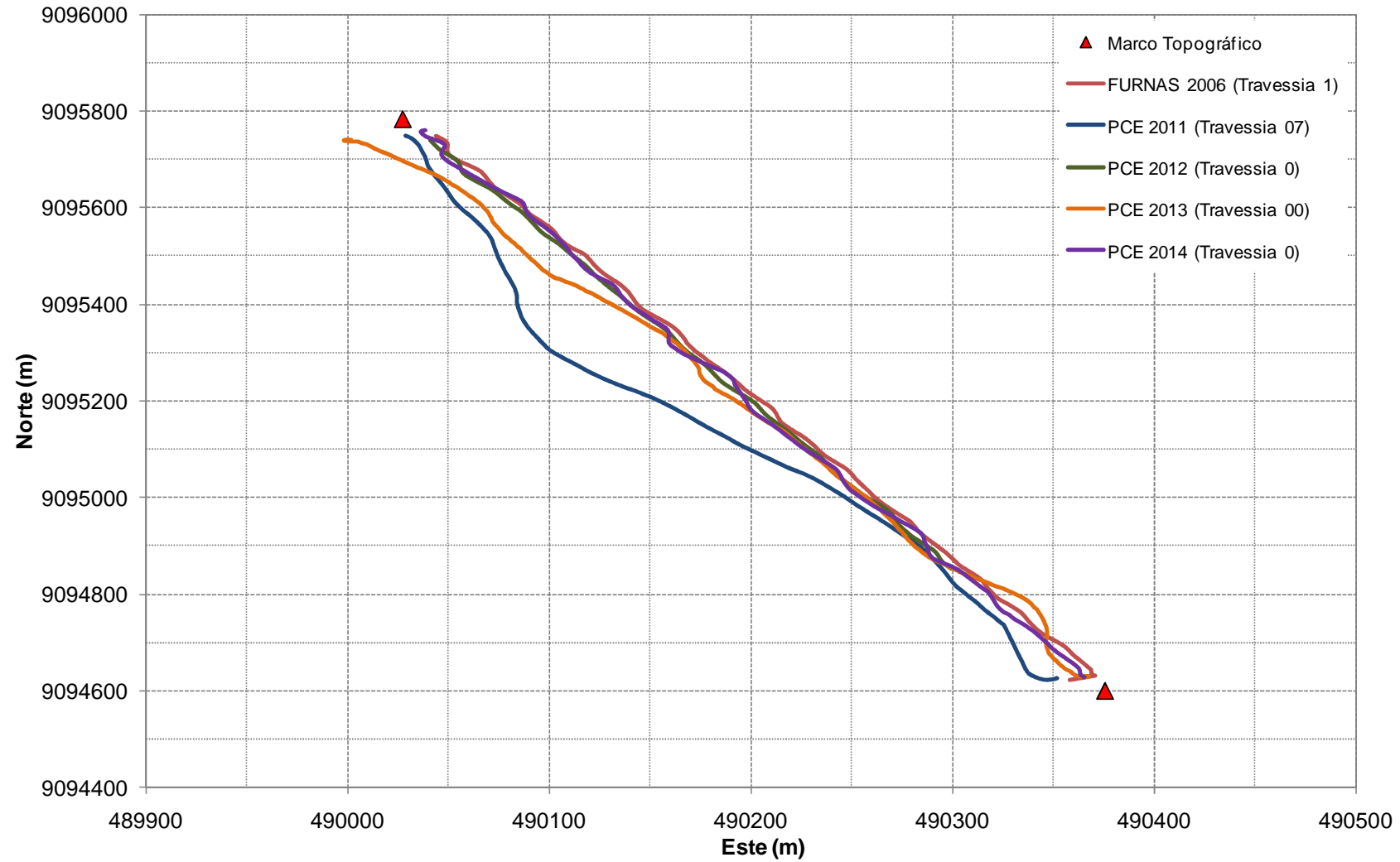
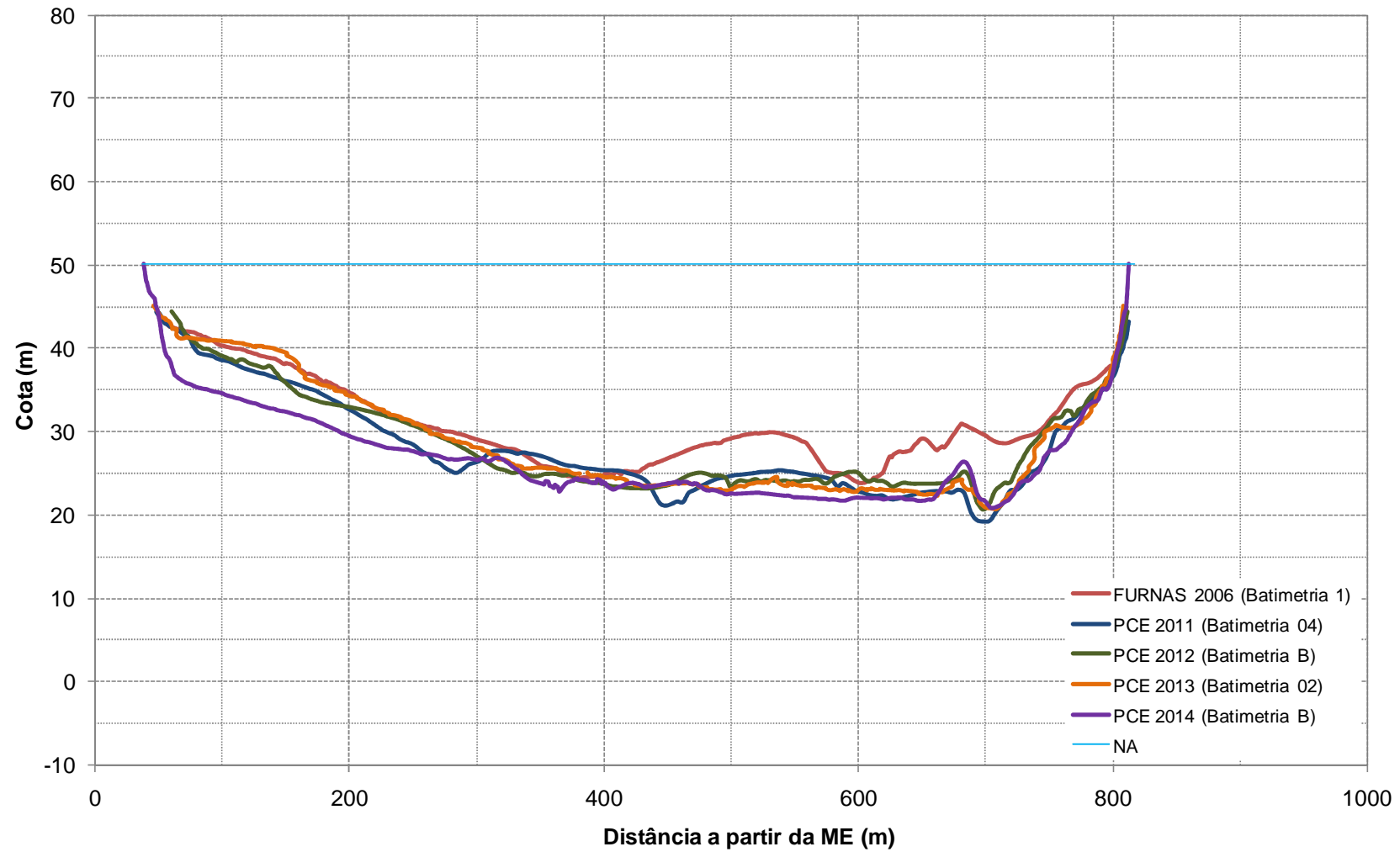


Figura 3.14.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 113,8



**Figura 3.15.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 113,8**

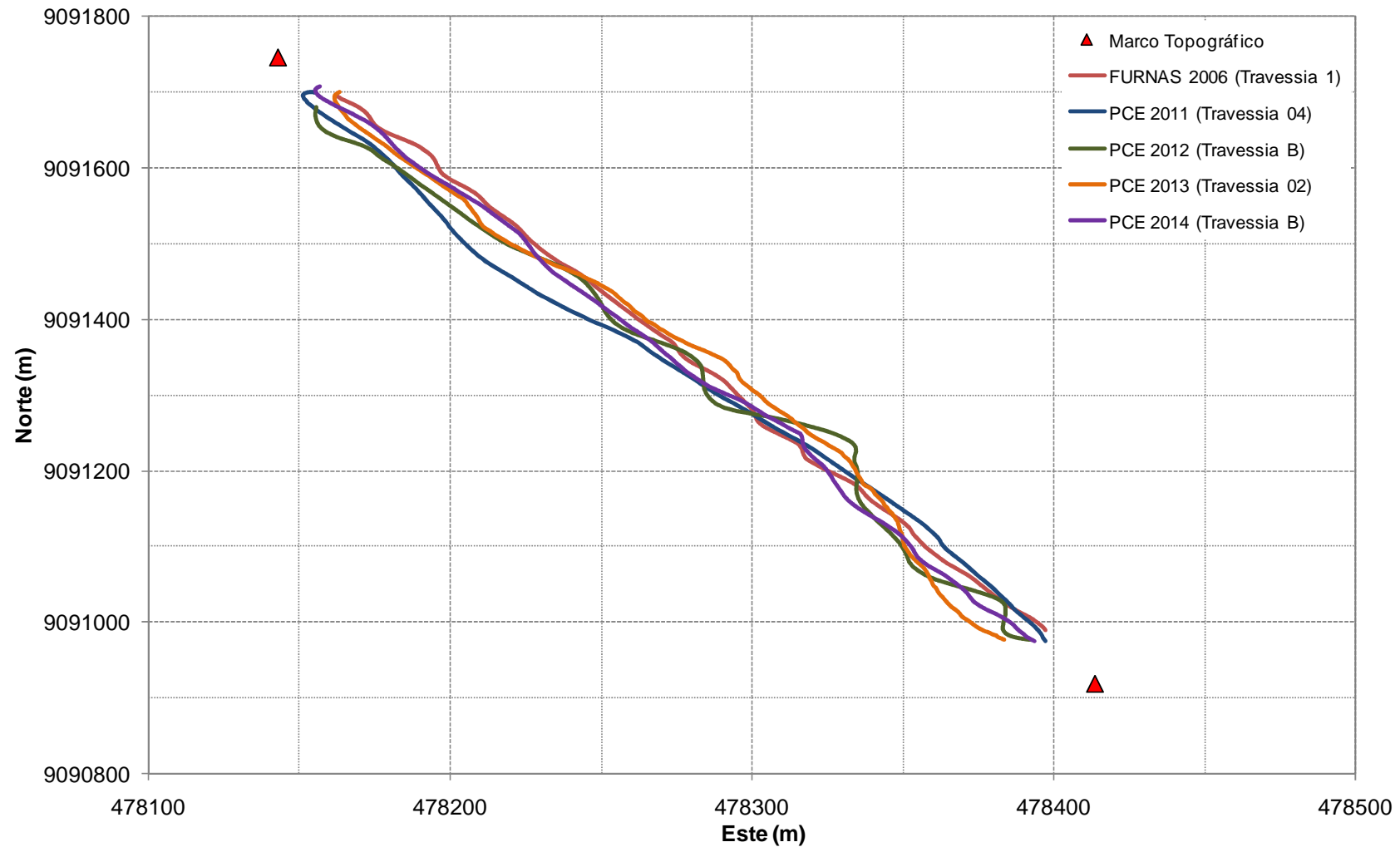


Figura 3.16.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 129,8

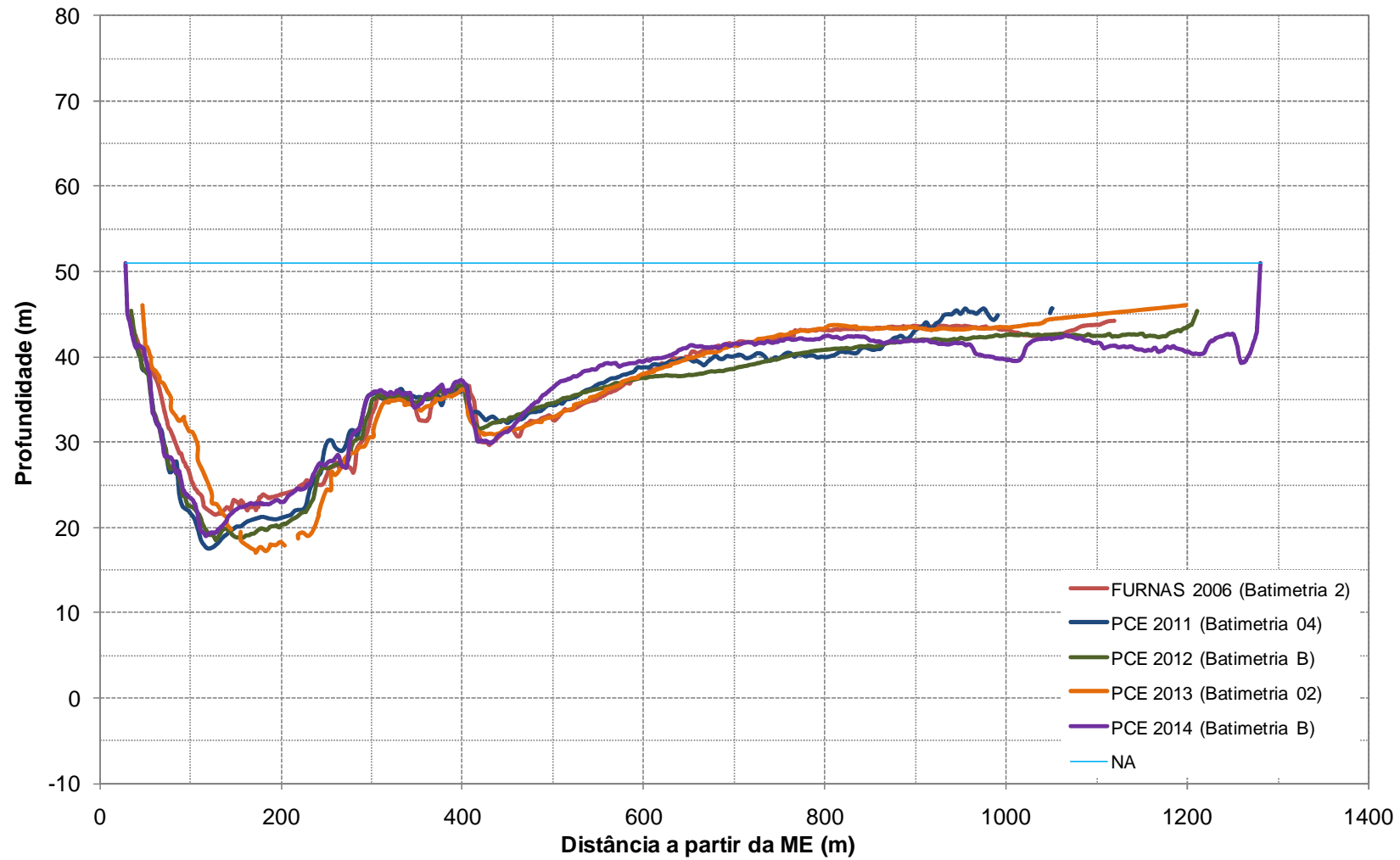


Figura 3.17.  
Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 129,8

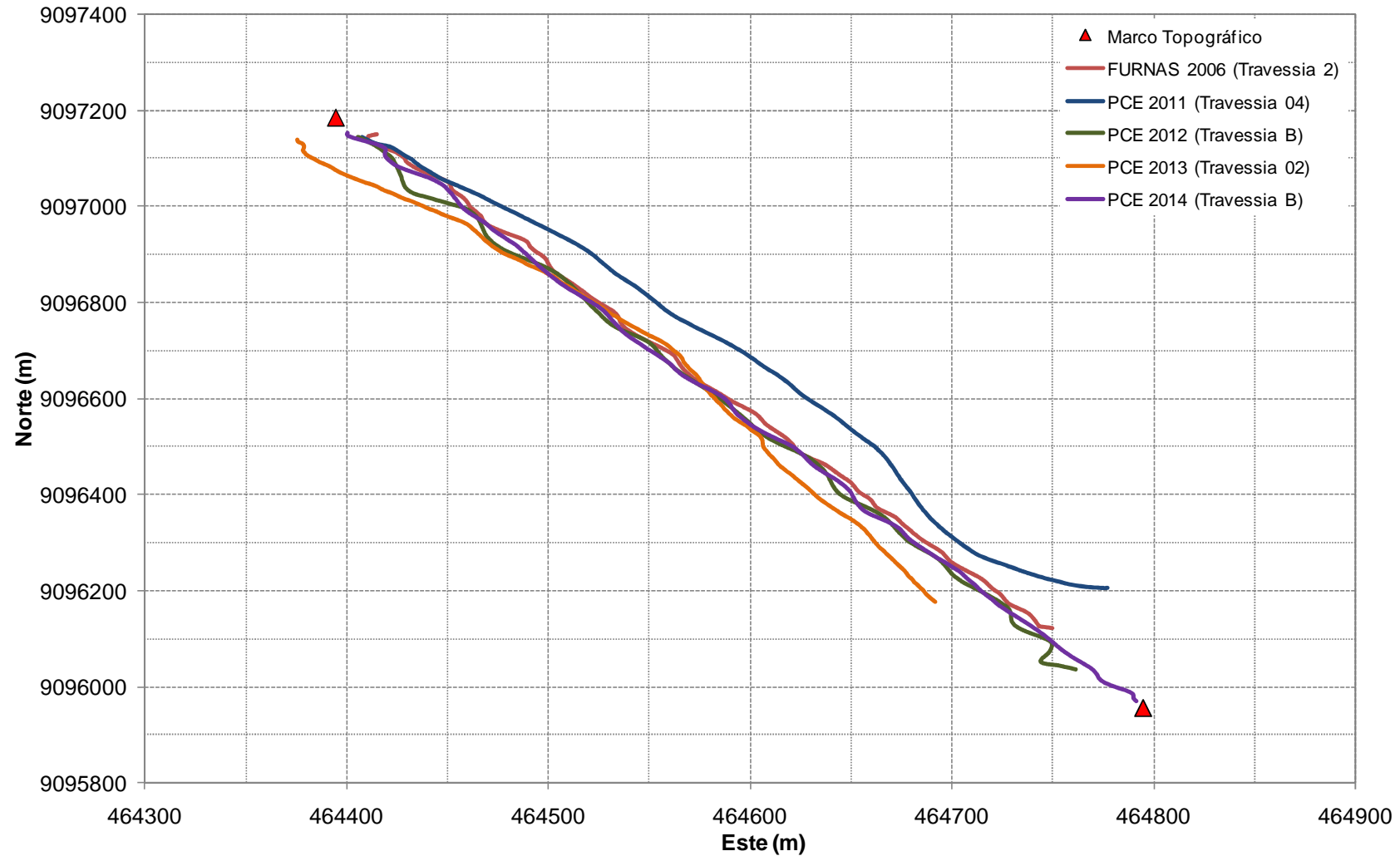
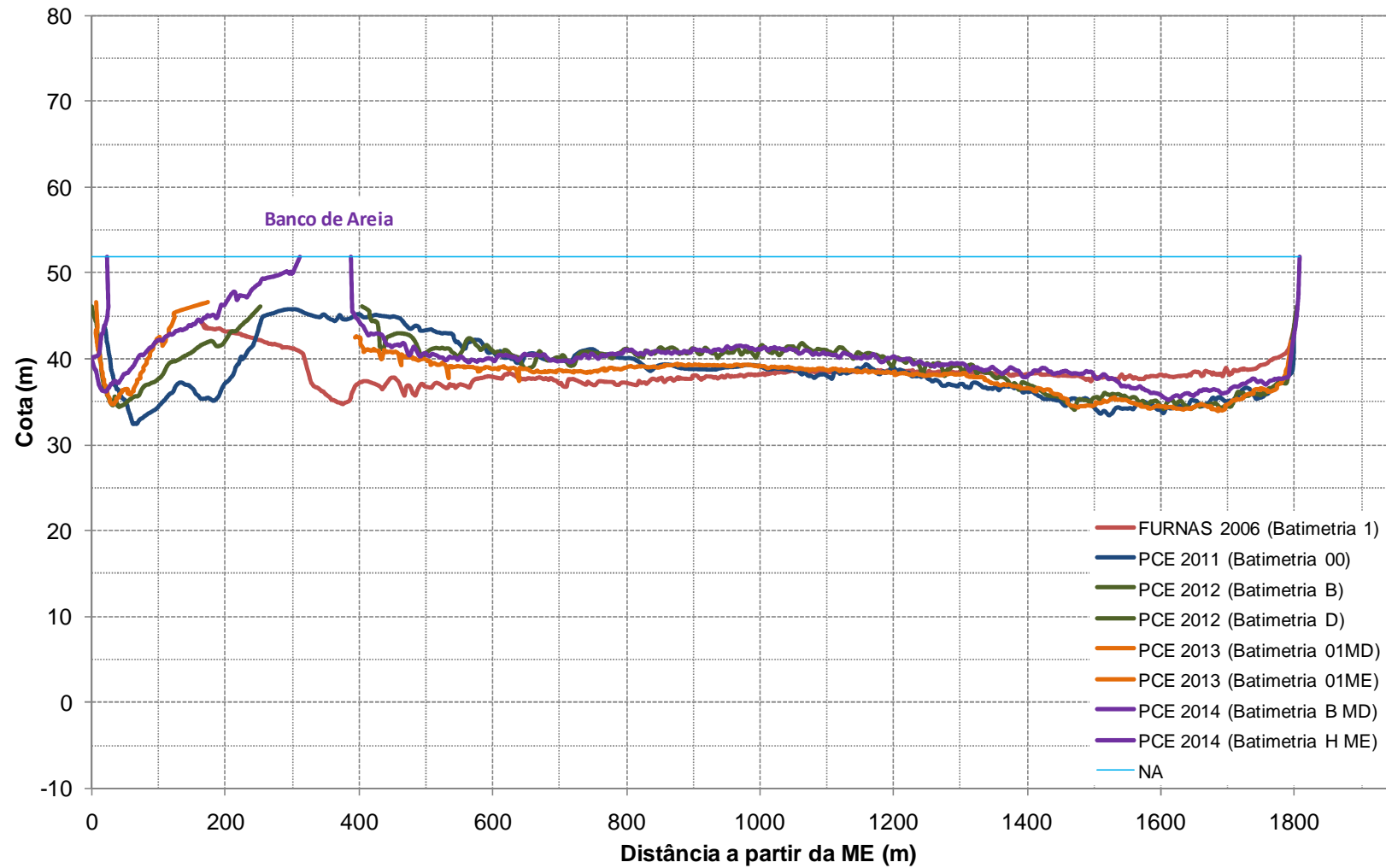


Figura 3.18.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 146,3



**Figura 3.19.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 146,3**

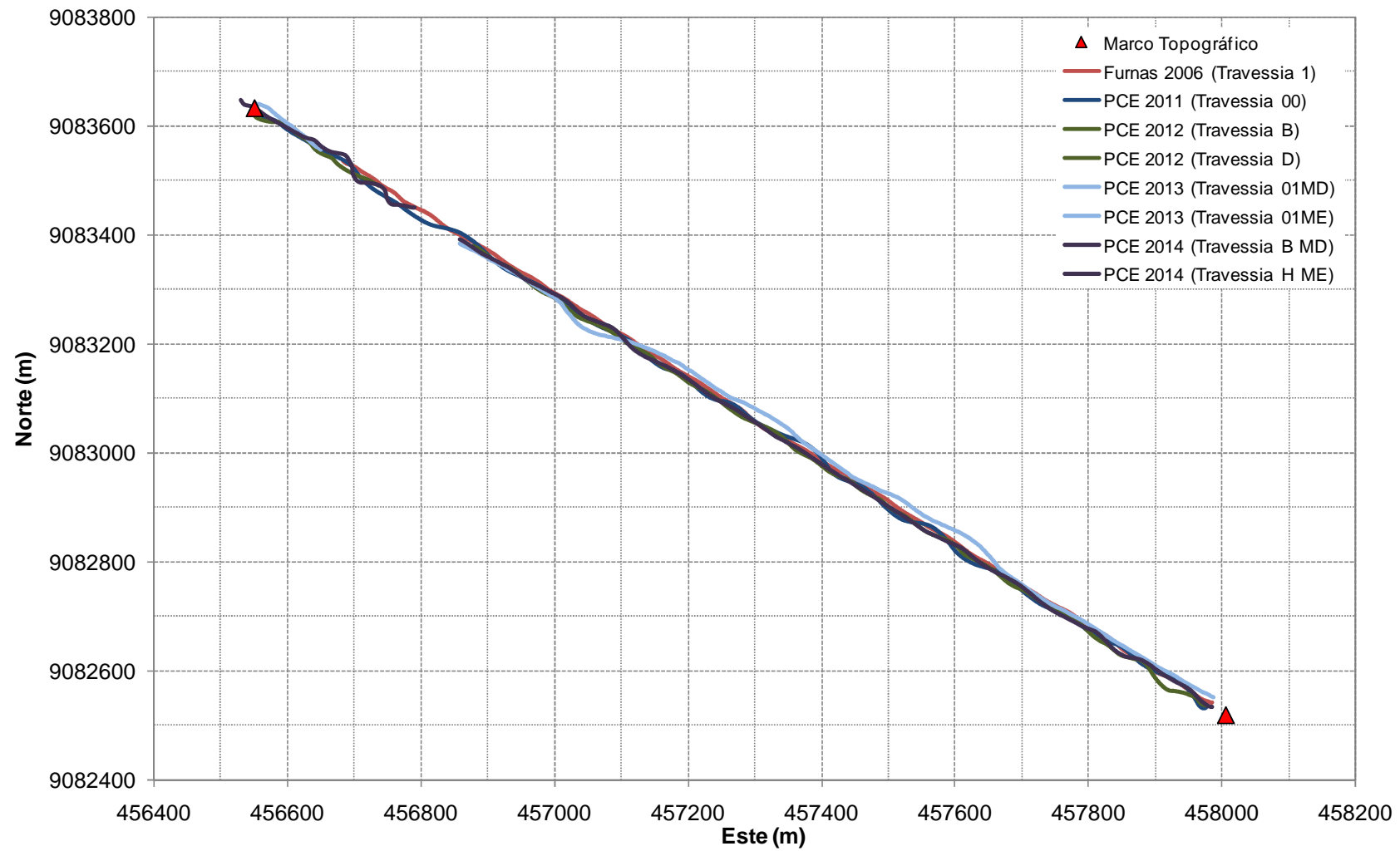
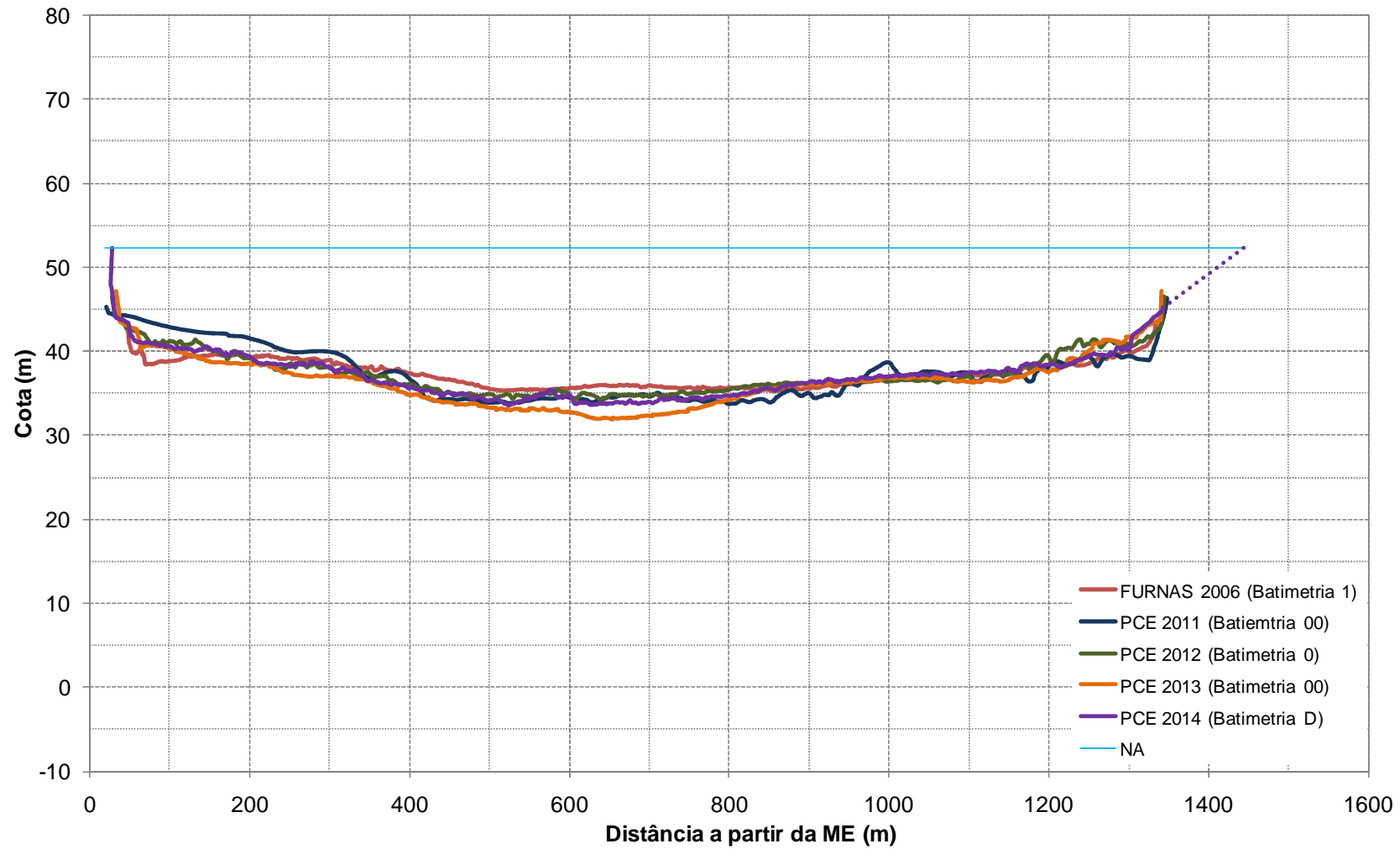




Figura 3.20.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 157,1



**Figura 3.21.**  
**Trajетória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 157,1**

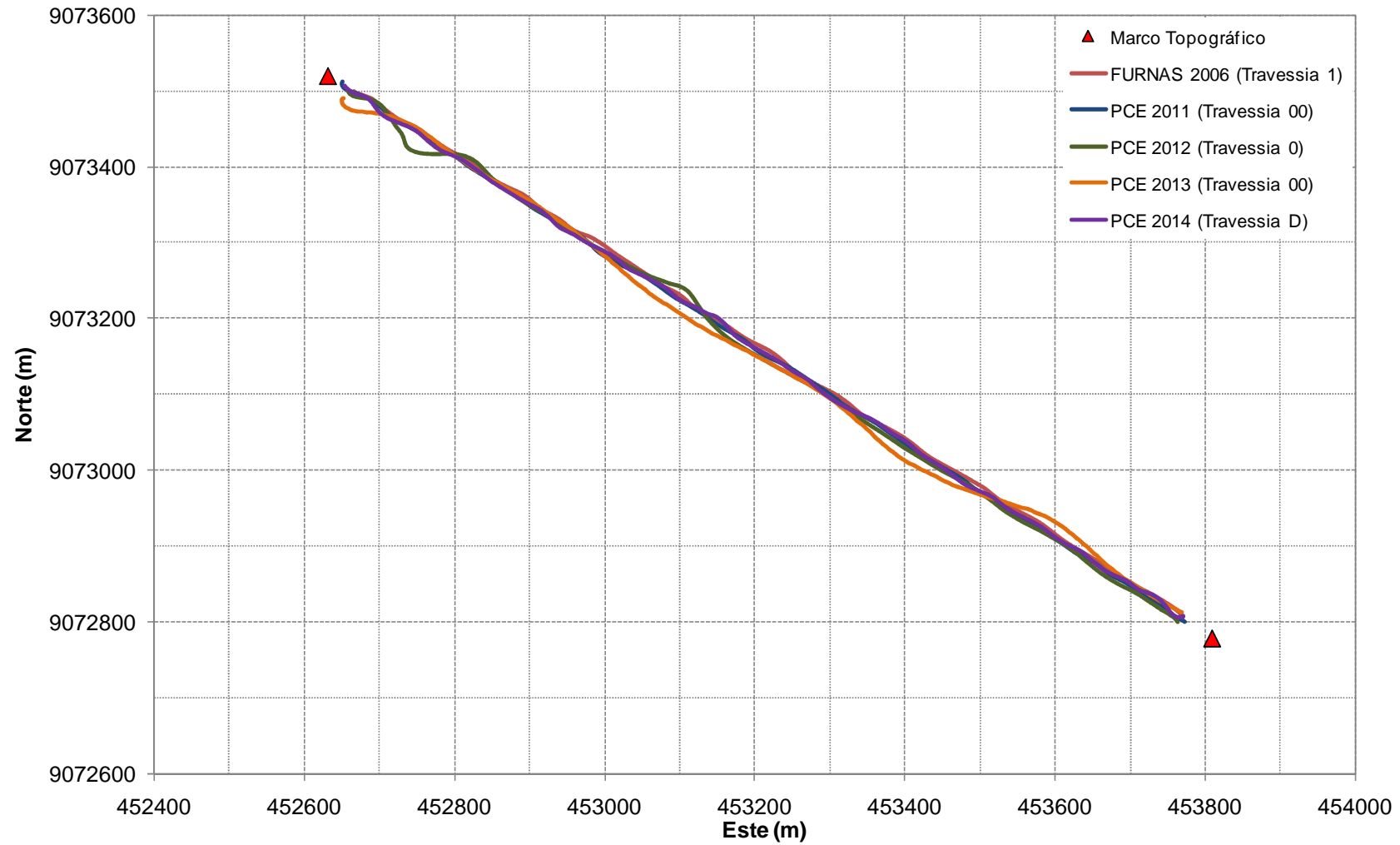
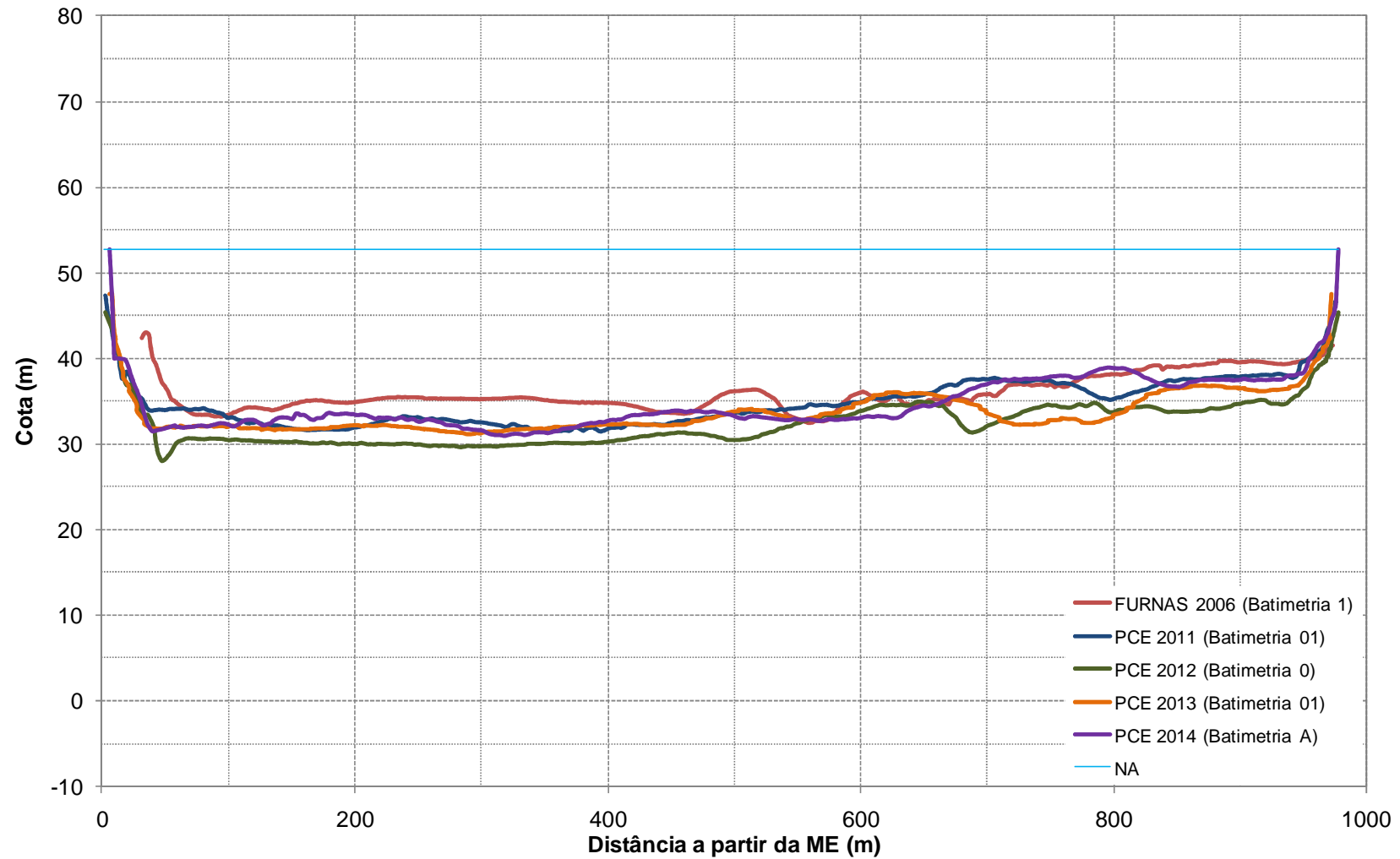


Figura 3.22.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 165,8



**Figura 3.23.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 165,8**

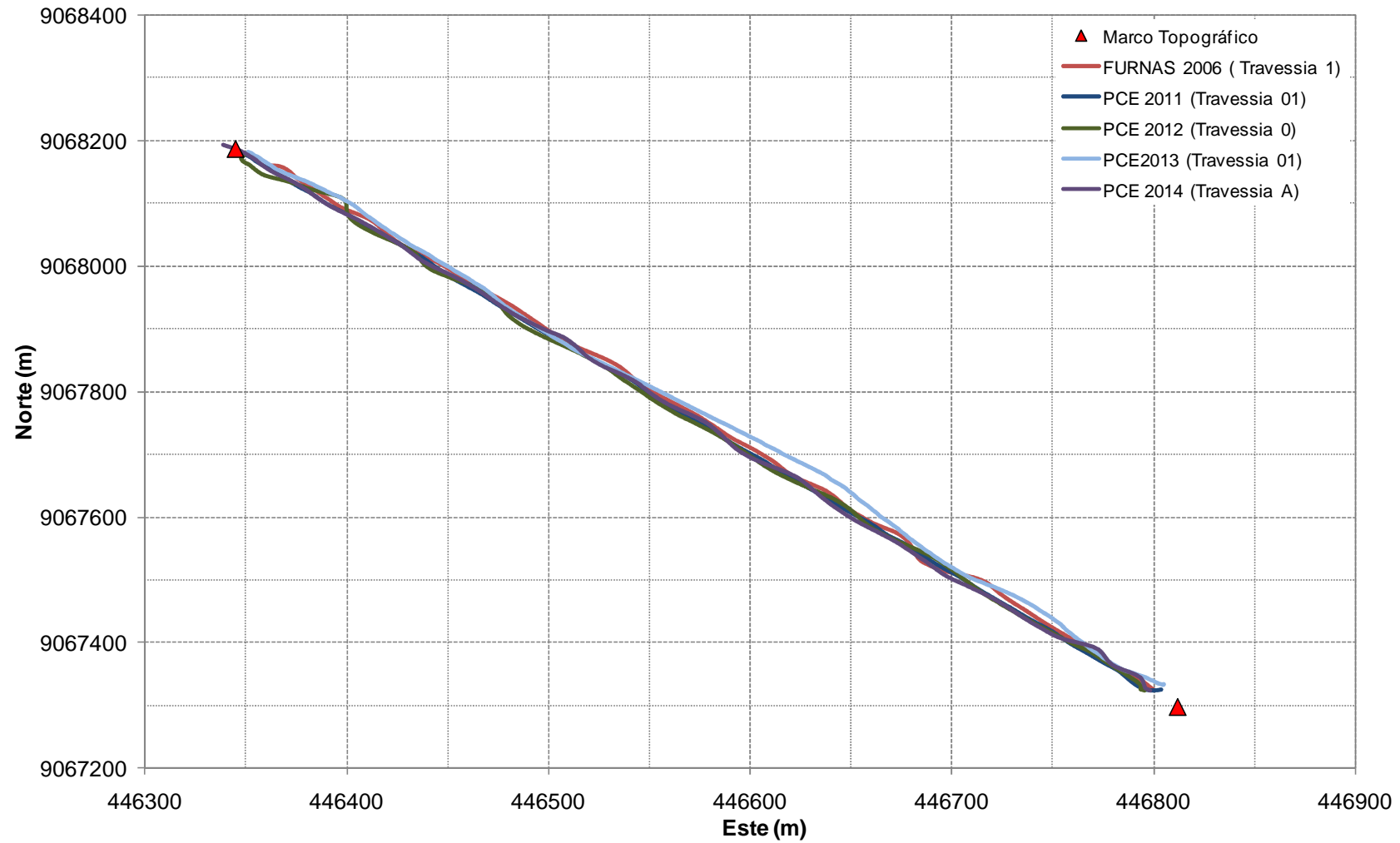


Figura 3.24.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 190,6

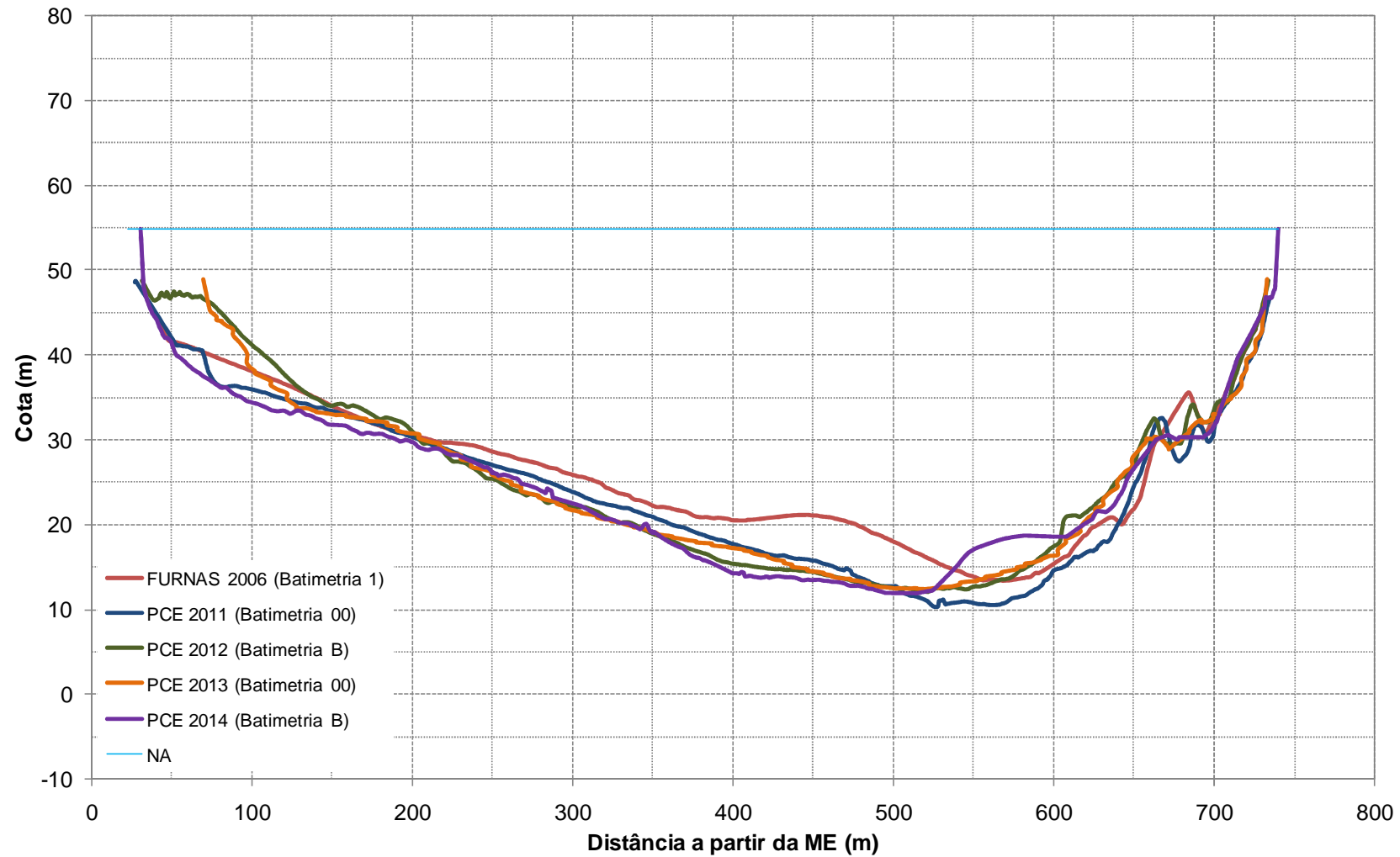


Figura 3.25.  
Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 190,6

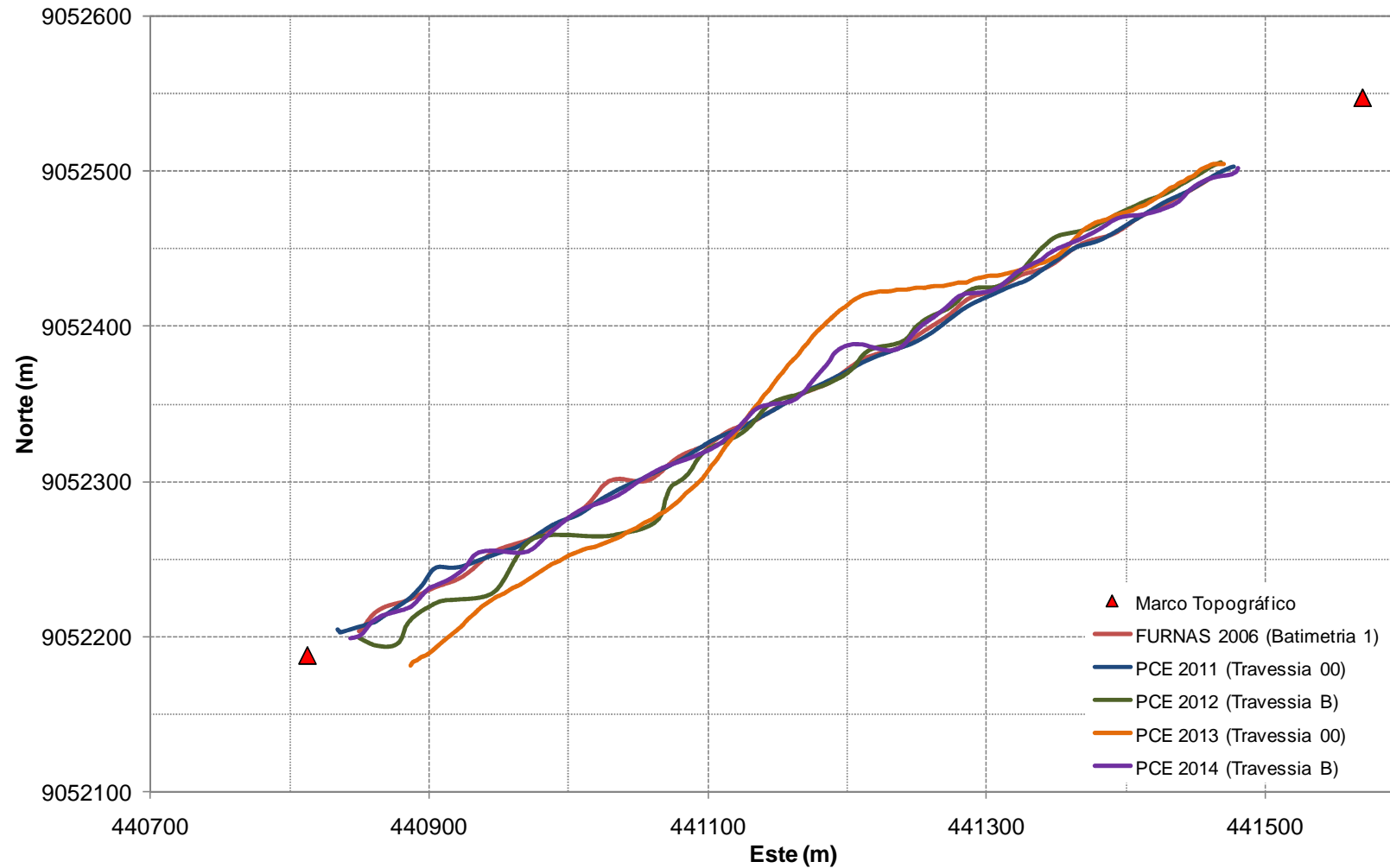


Figura 3.26.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 201,6

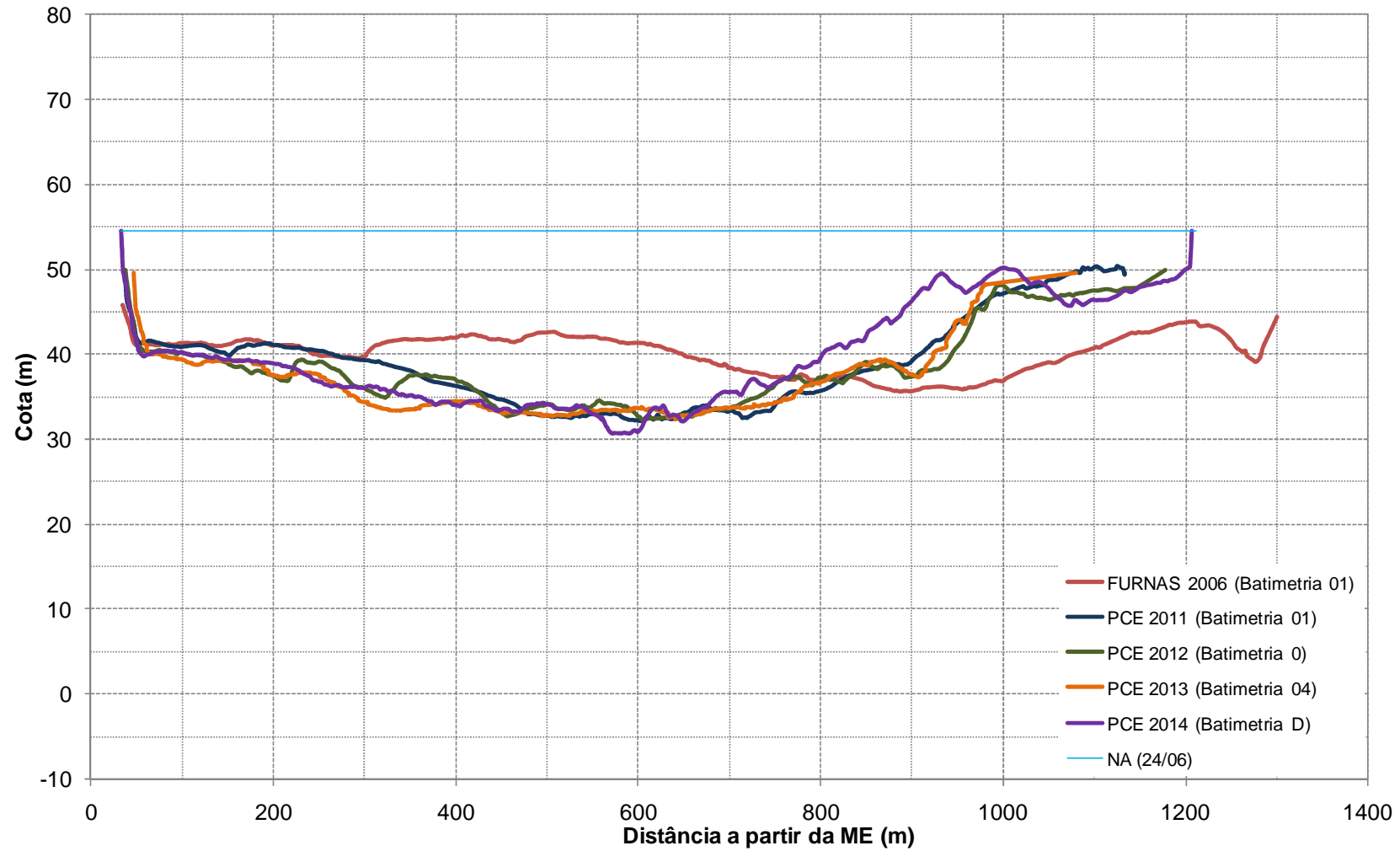


Figura 3.27.  
Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 201,6

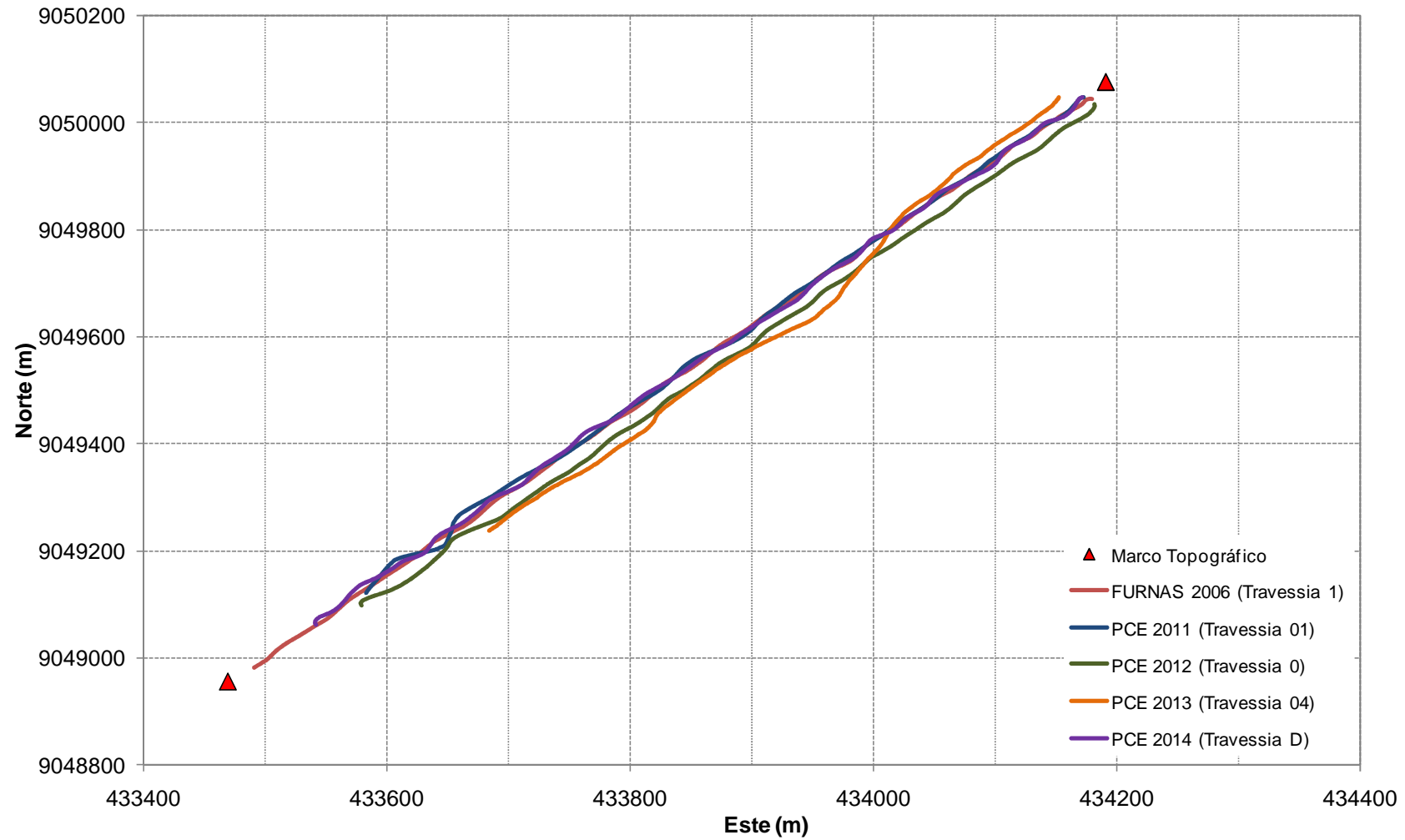




Figura 3.28.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 219,2

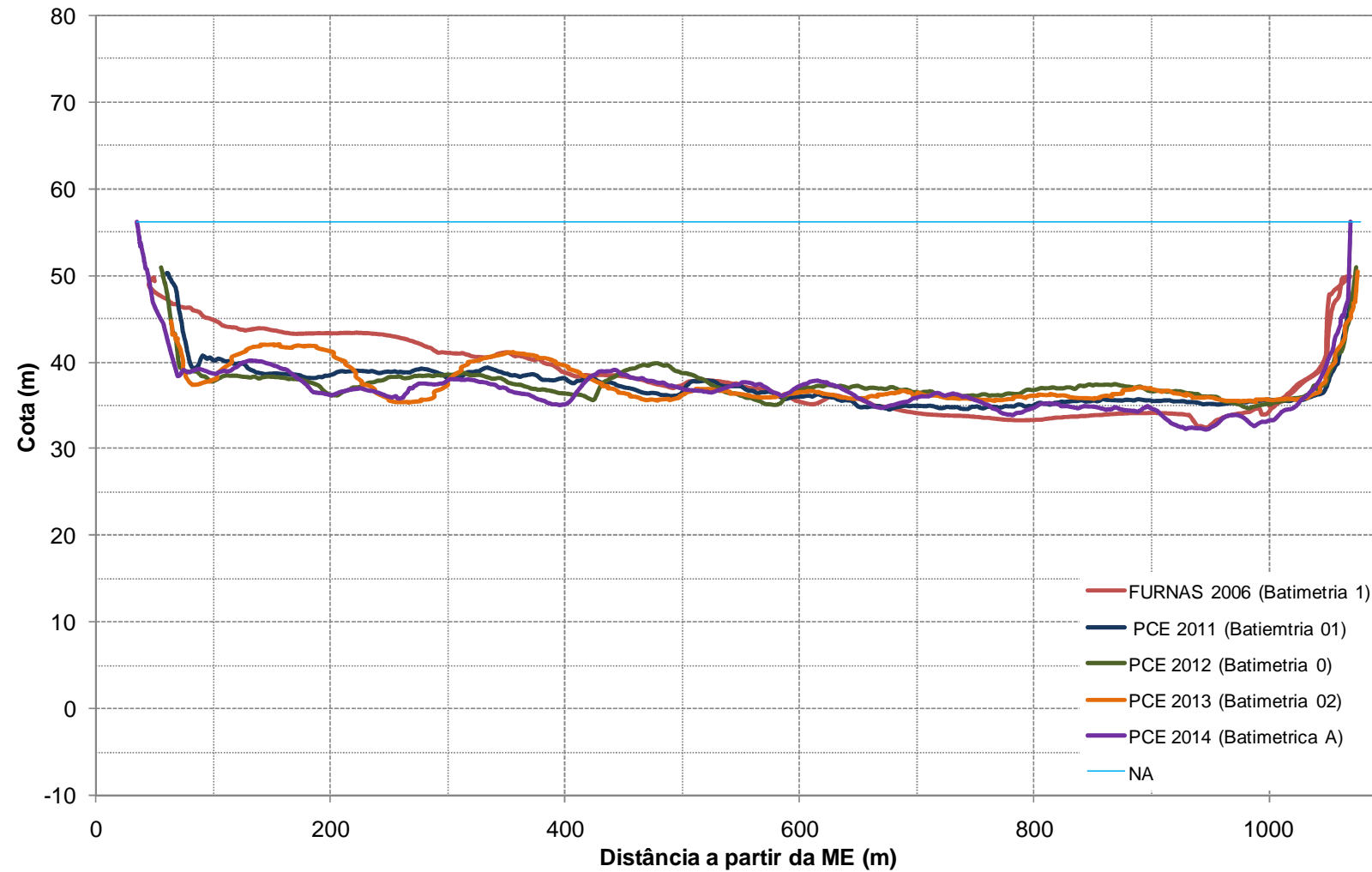


Figura 3.29.  
Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 219,2

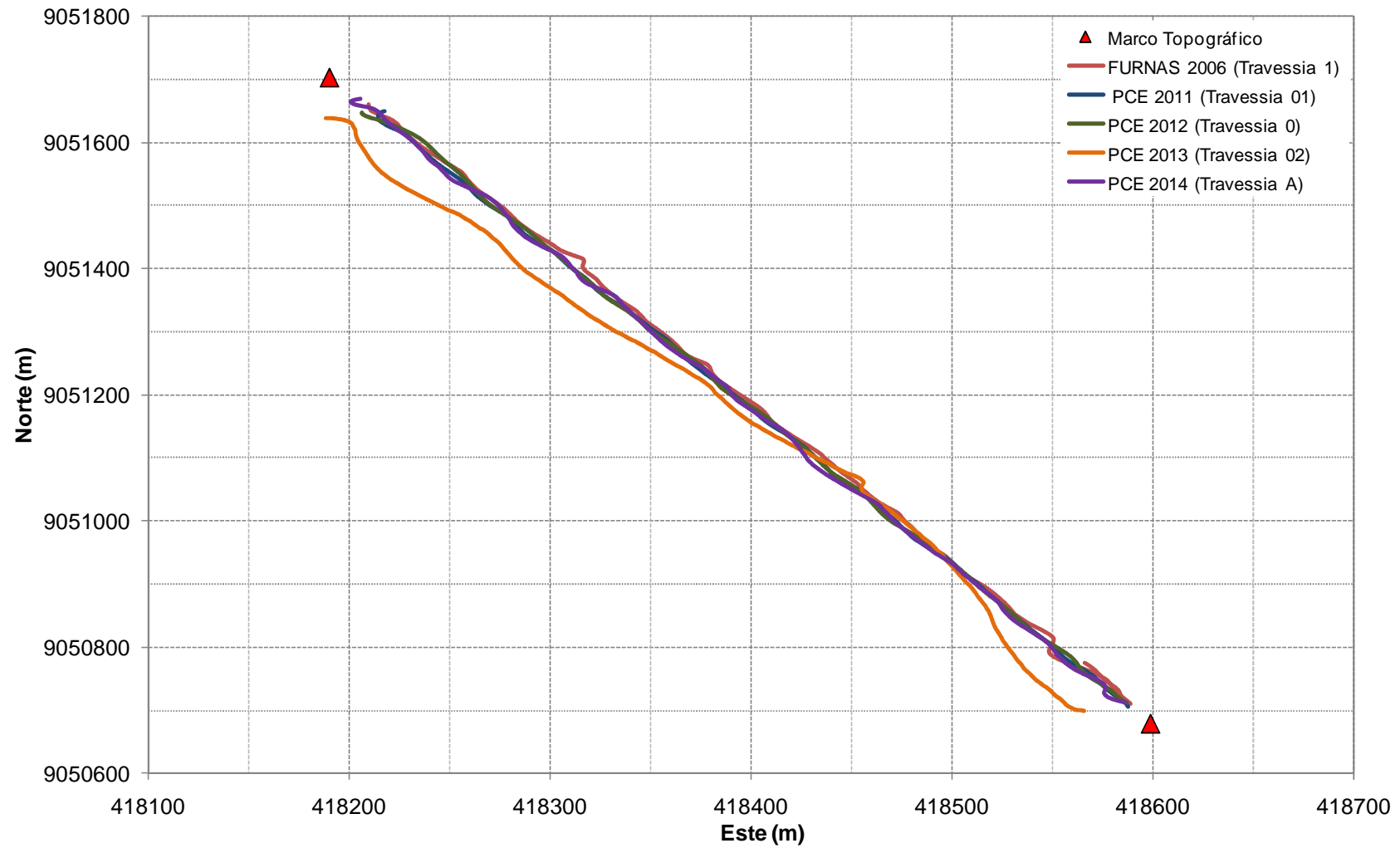
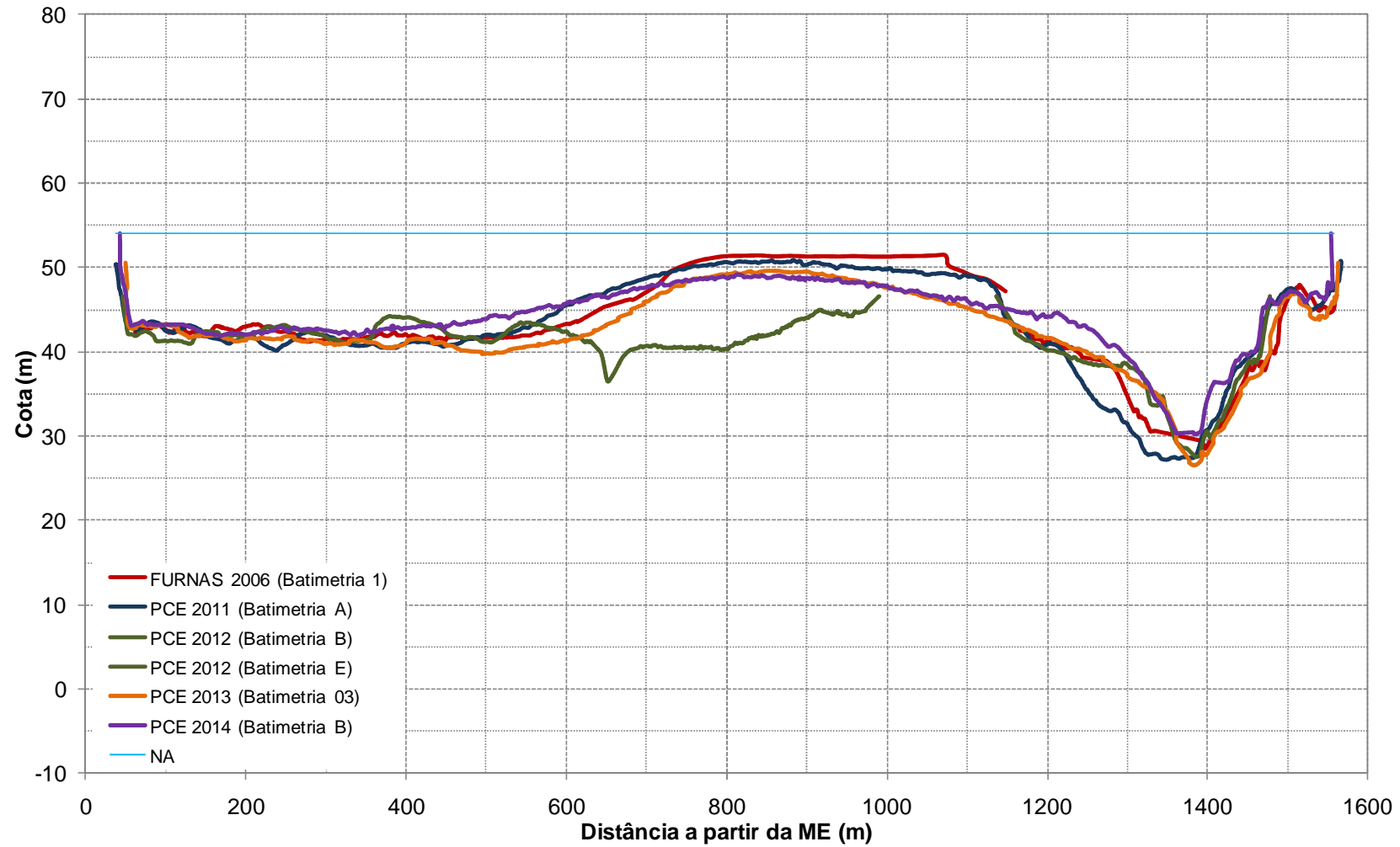


Figura 3.30.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 230,2



**Figura 3.31.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 230,2**

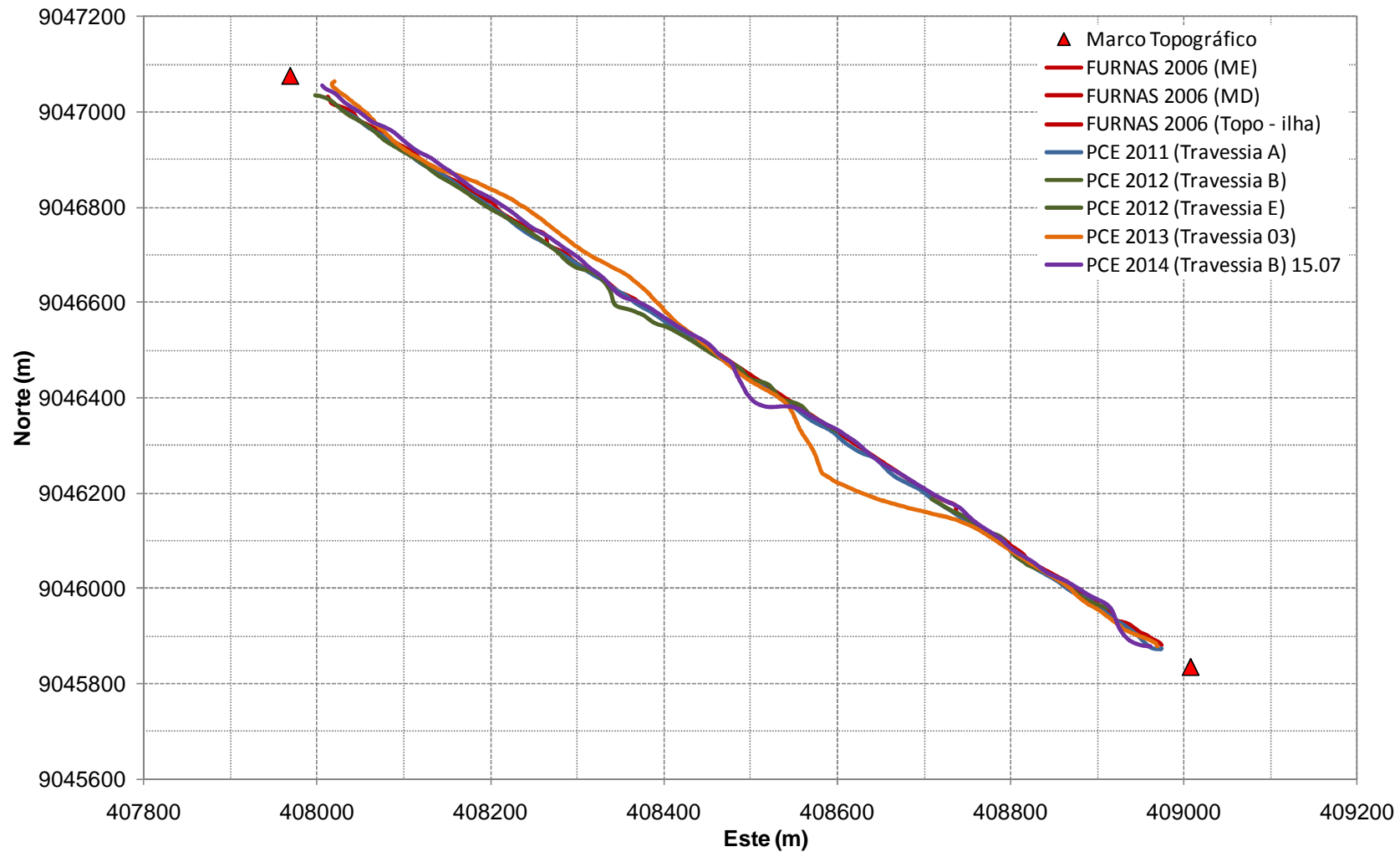


Figura 3.32.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 242,6

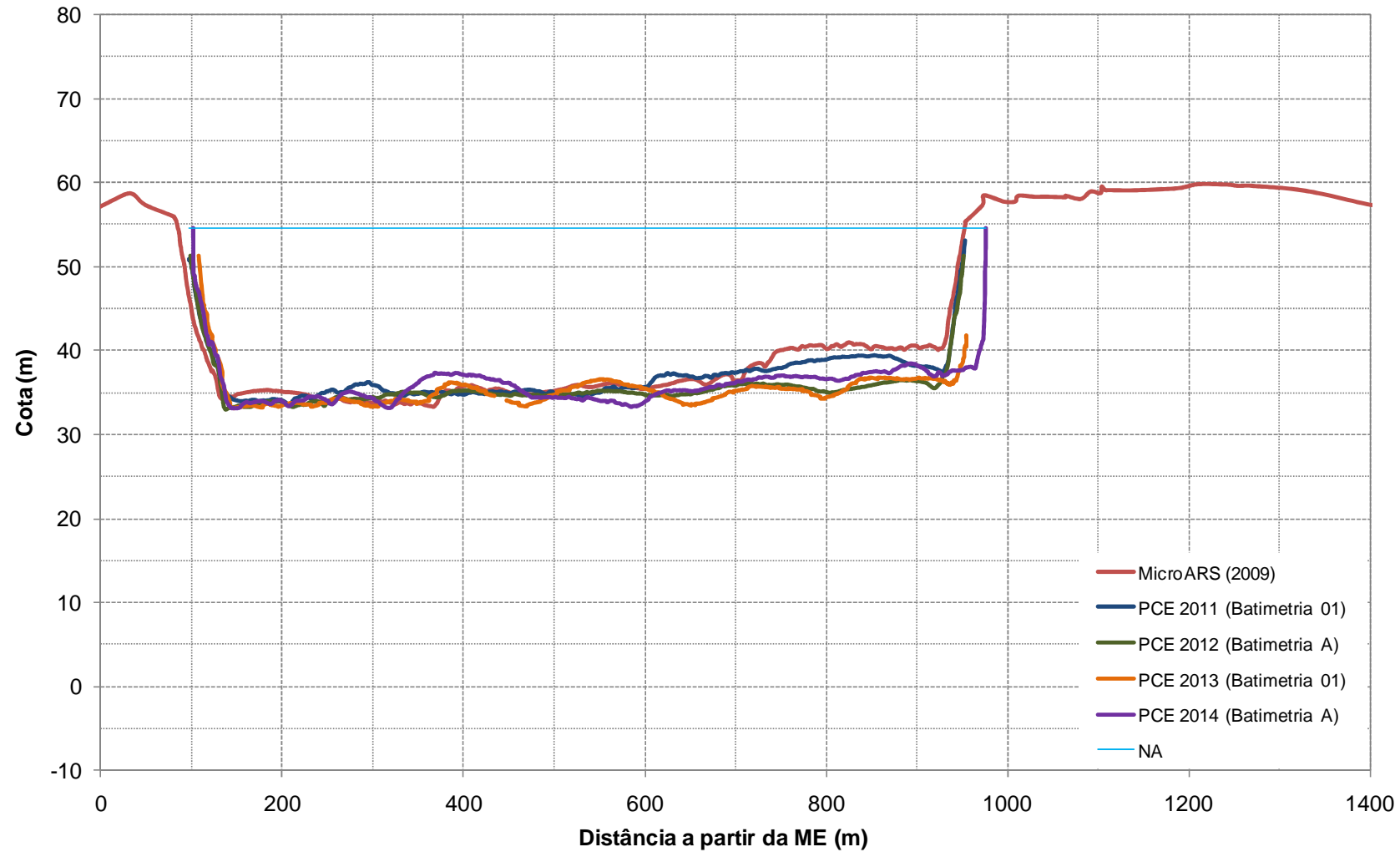


Figura 3.33.  
Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 242,6

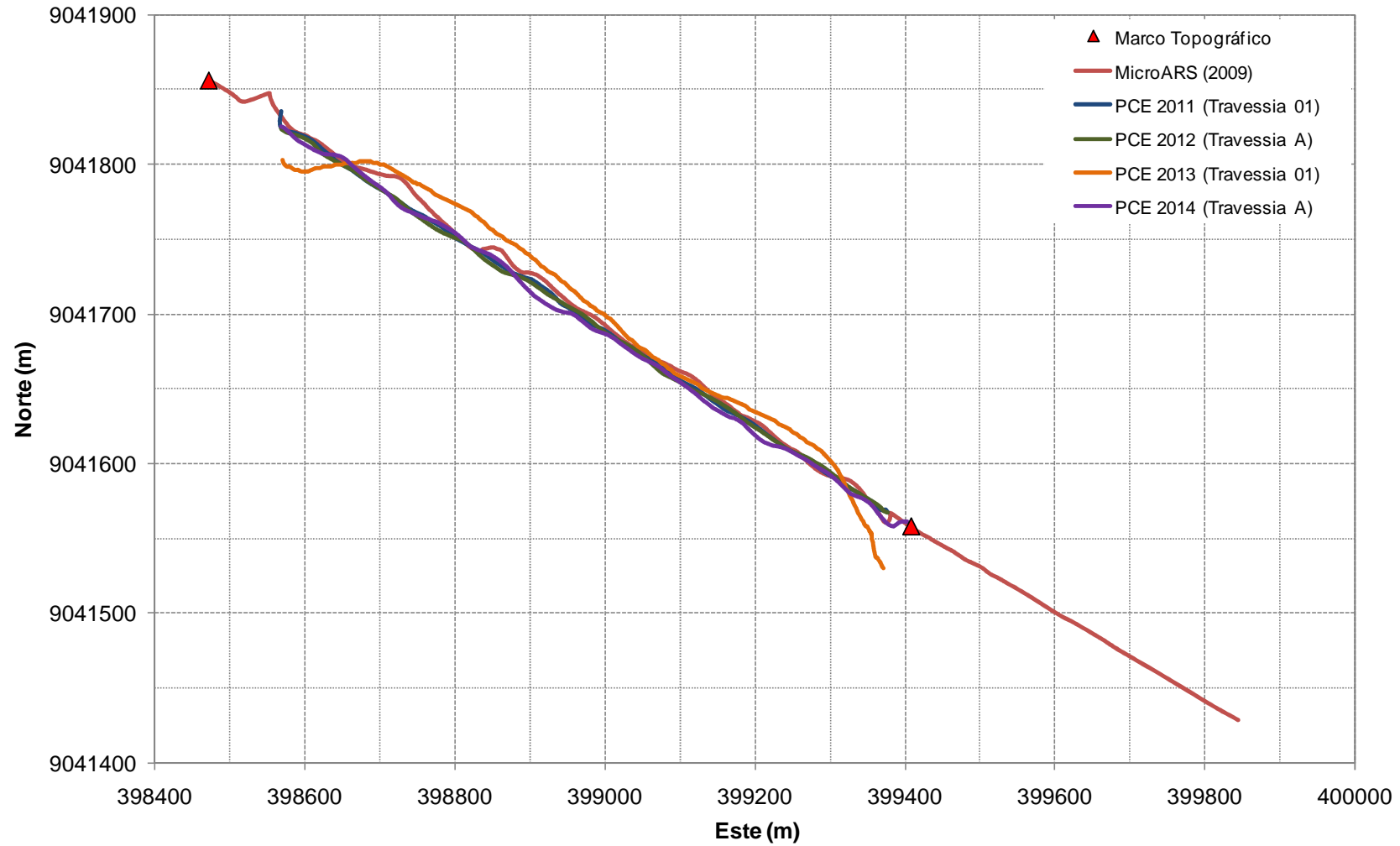


Figura 3.34.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 250,8

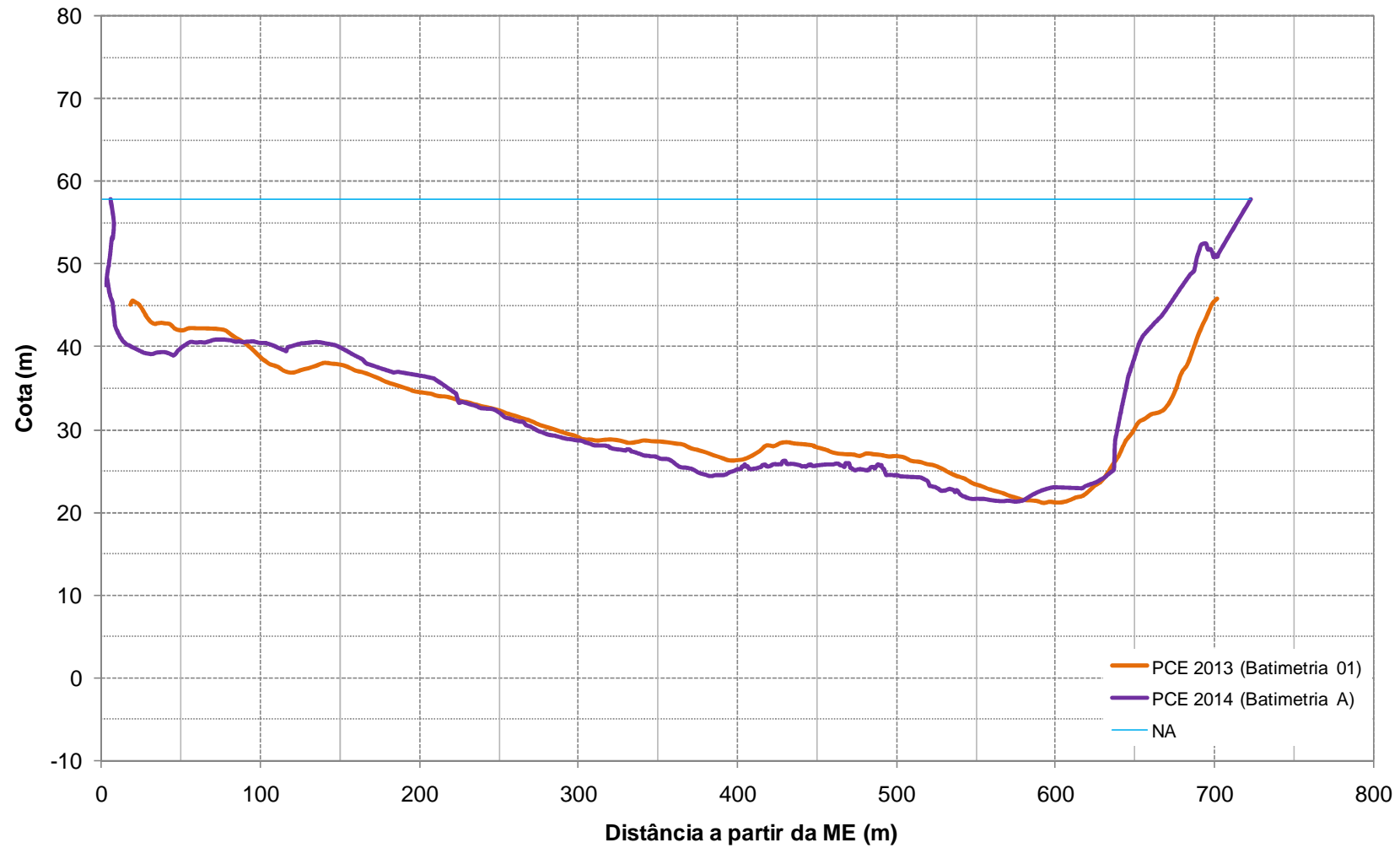


Figura 3.35.  
Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 250,8

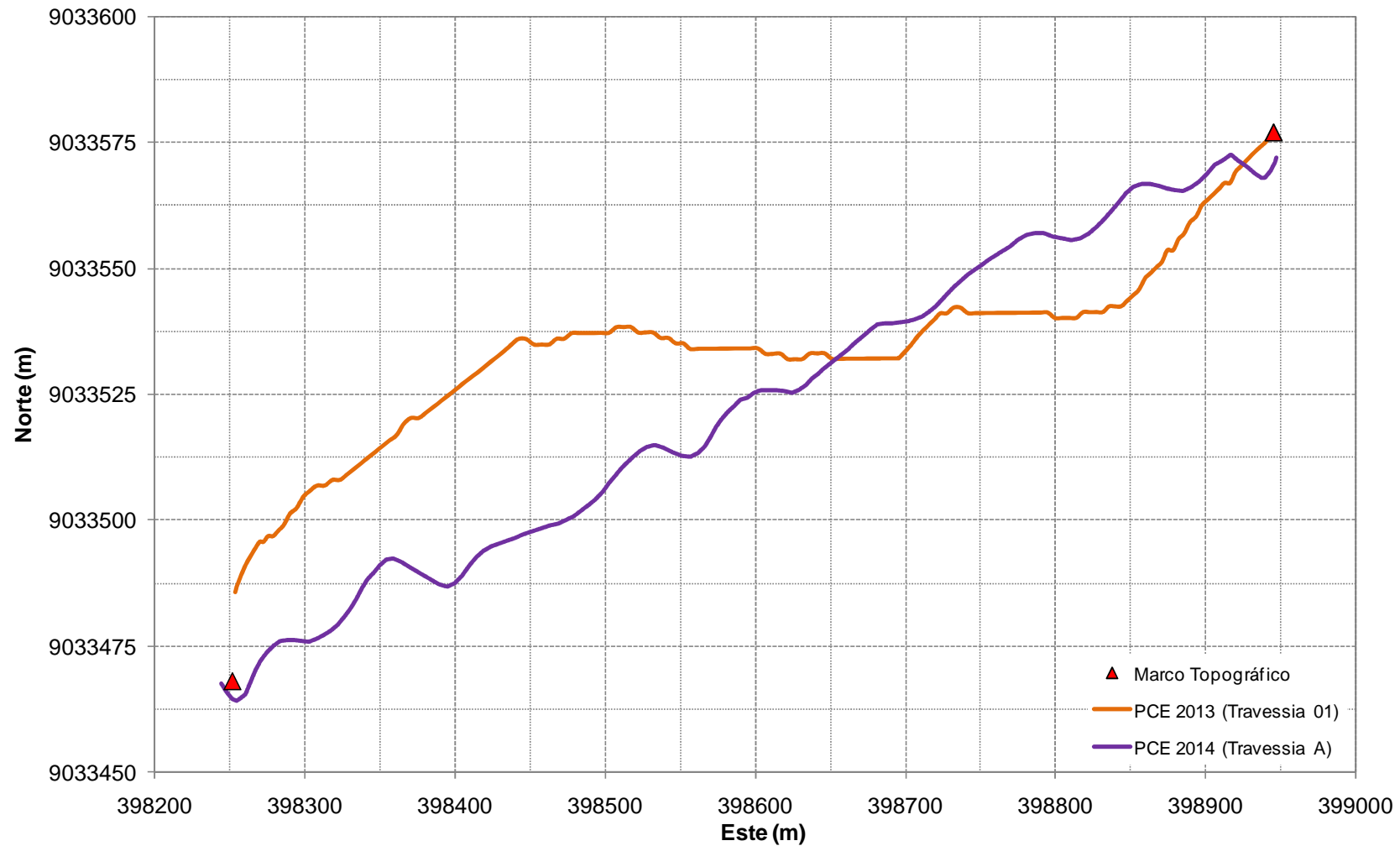




Figura 3.36.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 251,9

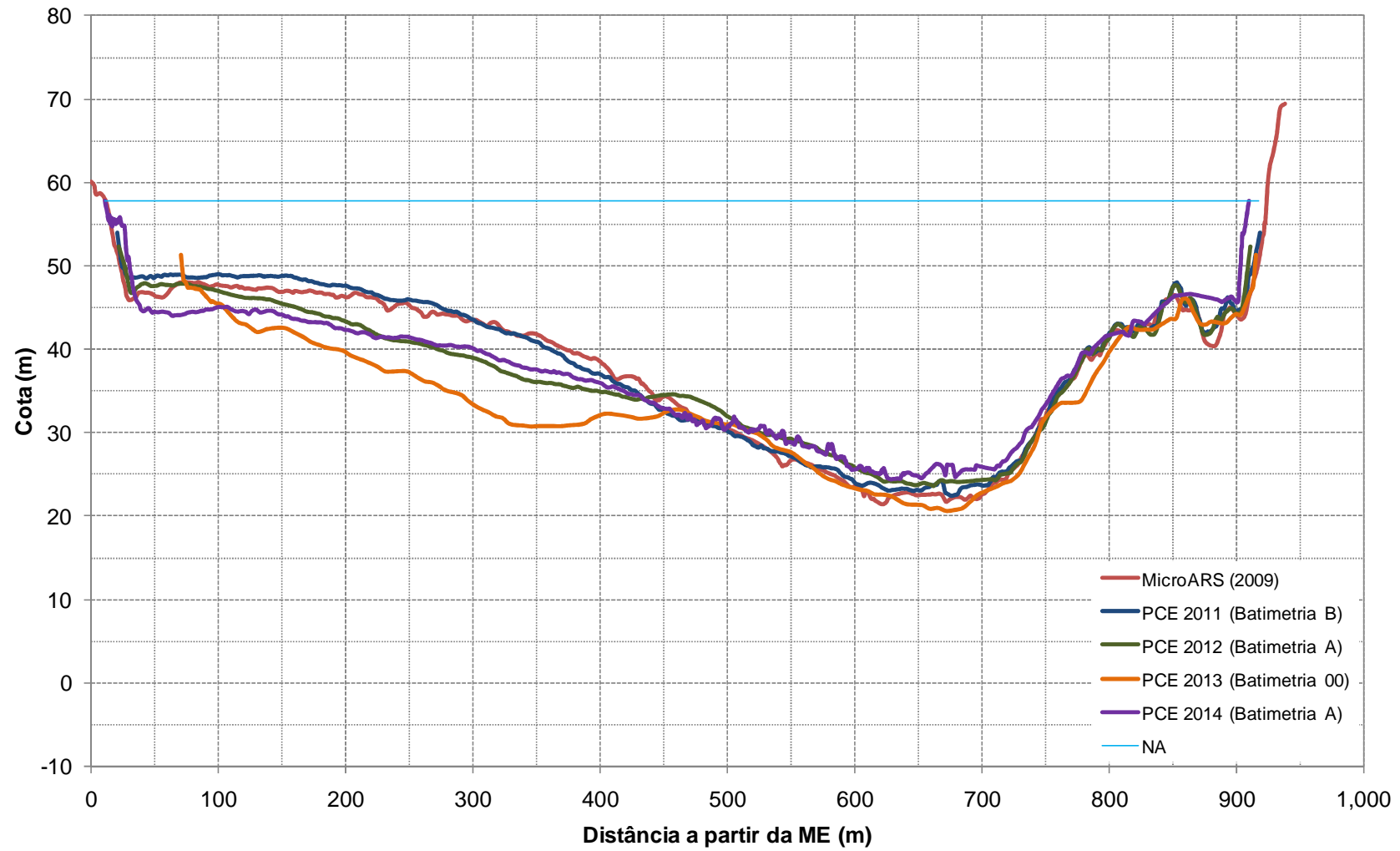


Figura 3.37.  
Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 251,9

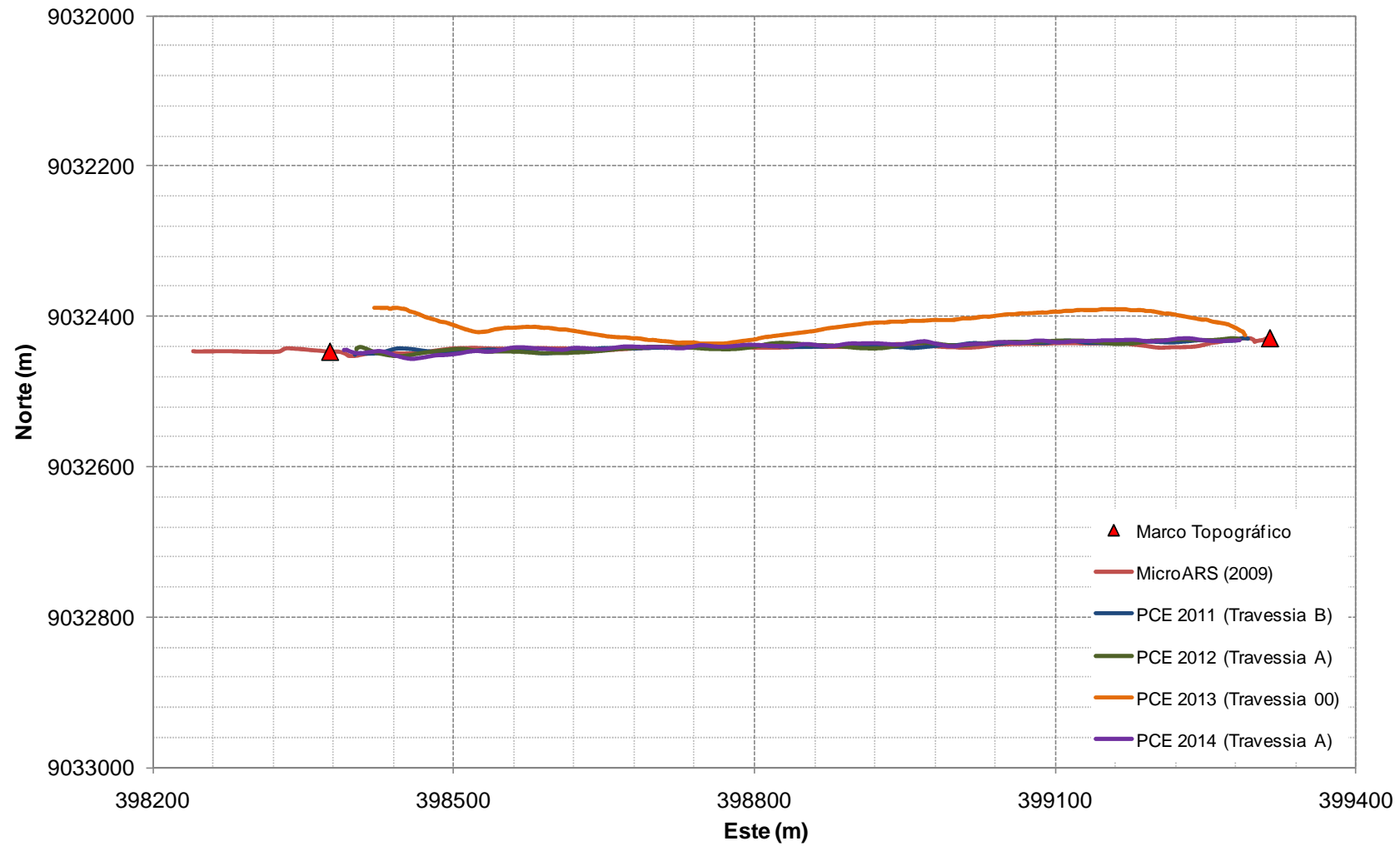
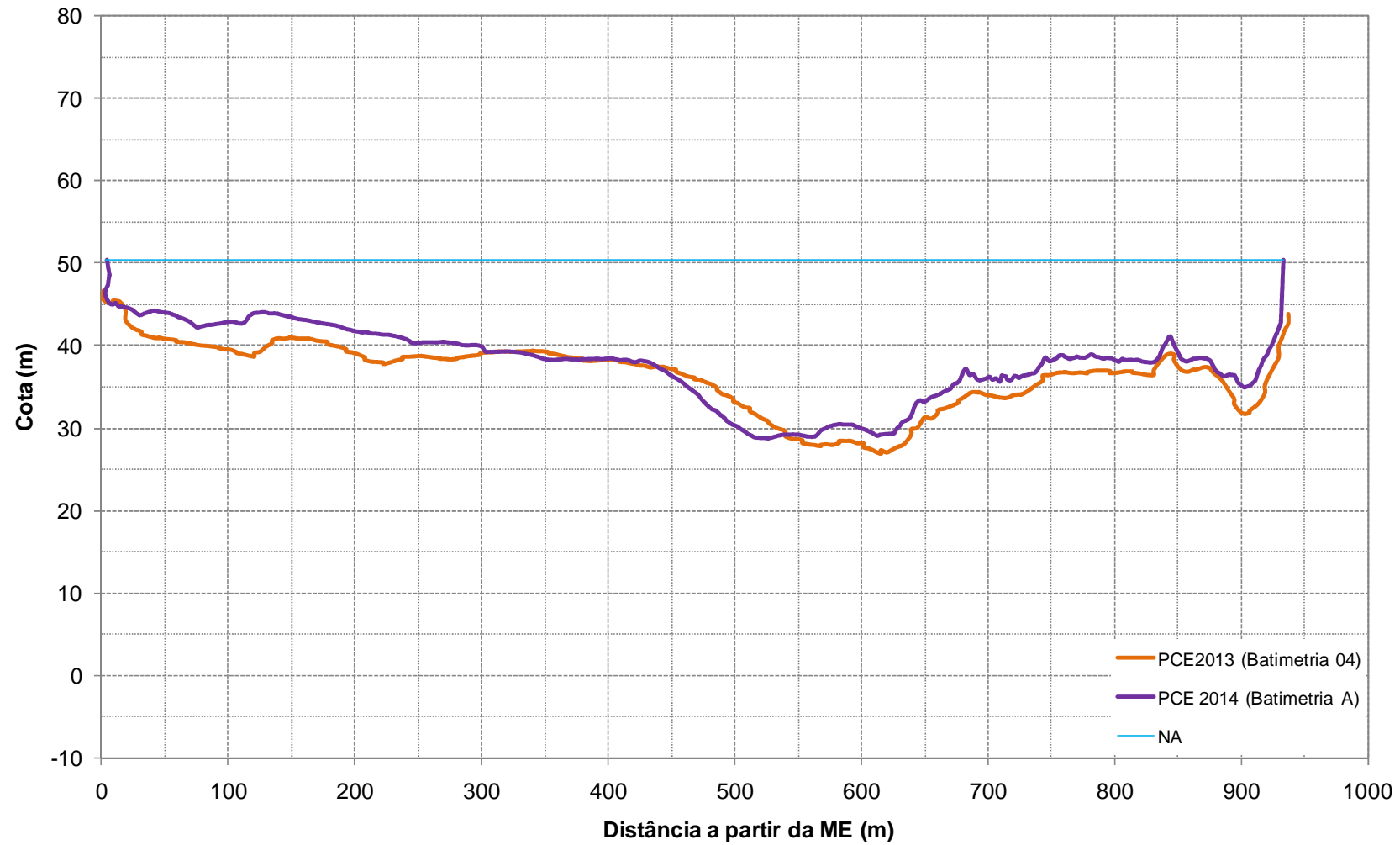


Figura 3.38.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 253,0



**Figura 3.39.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 253,0**

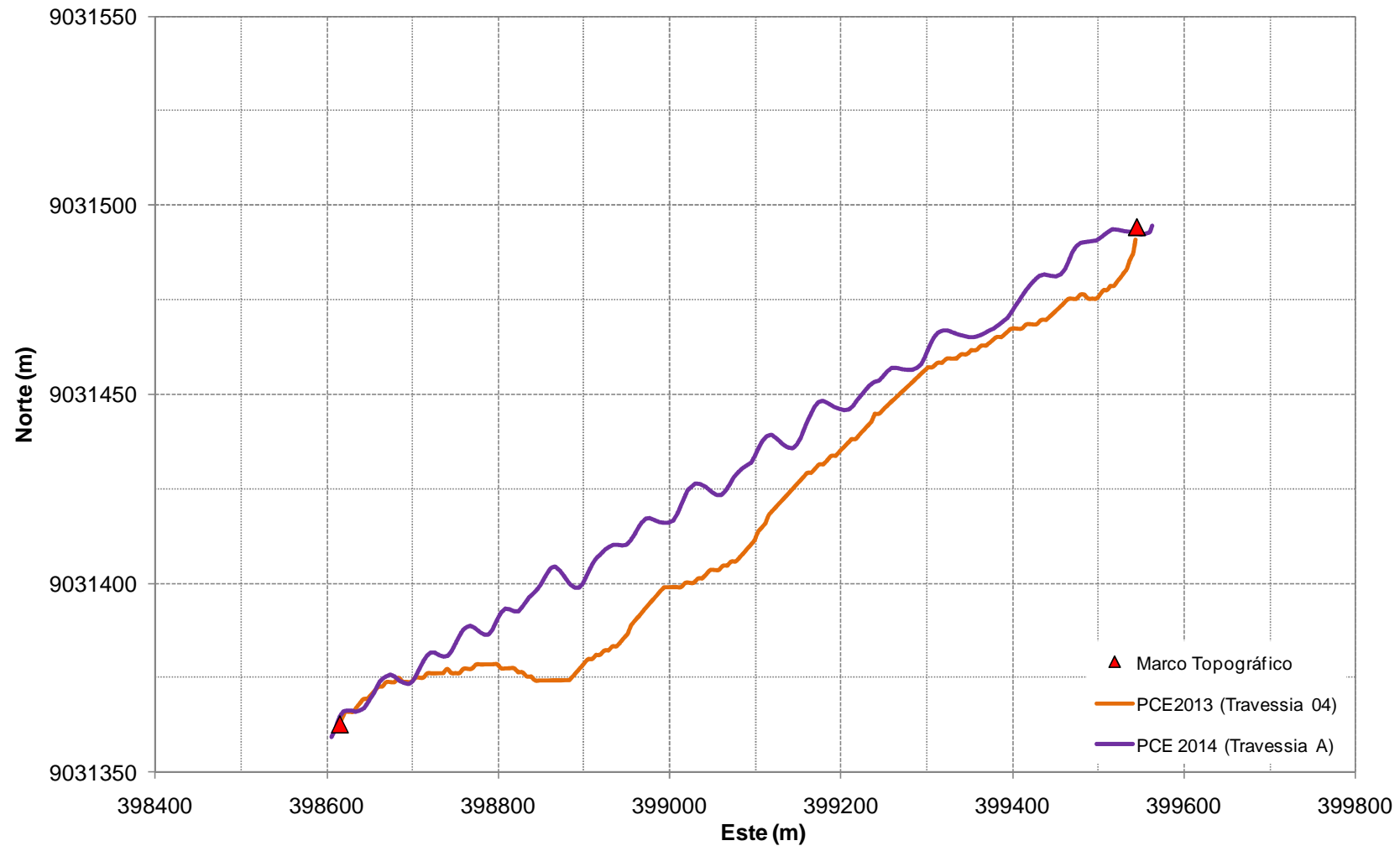
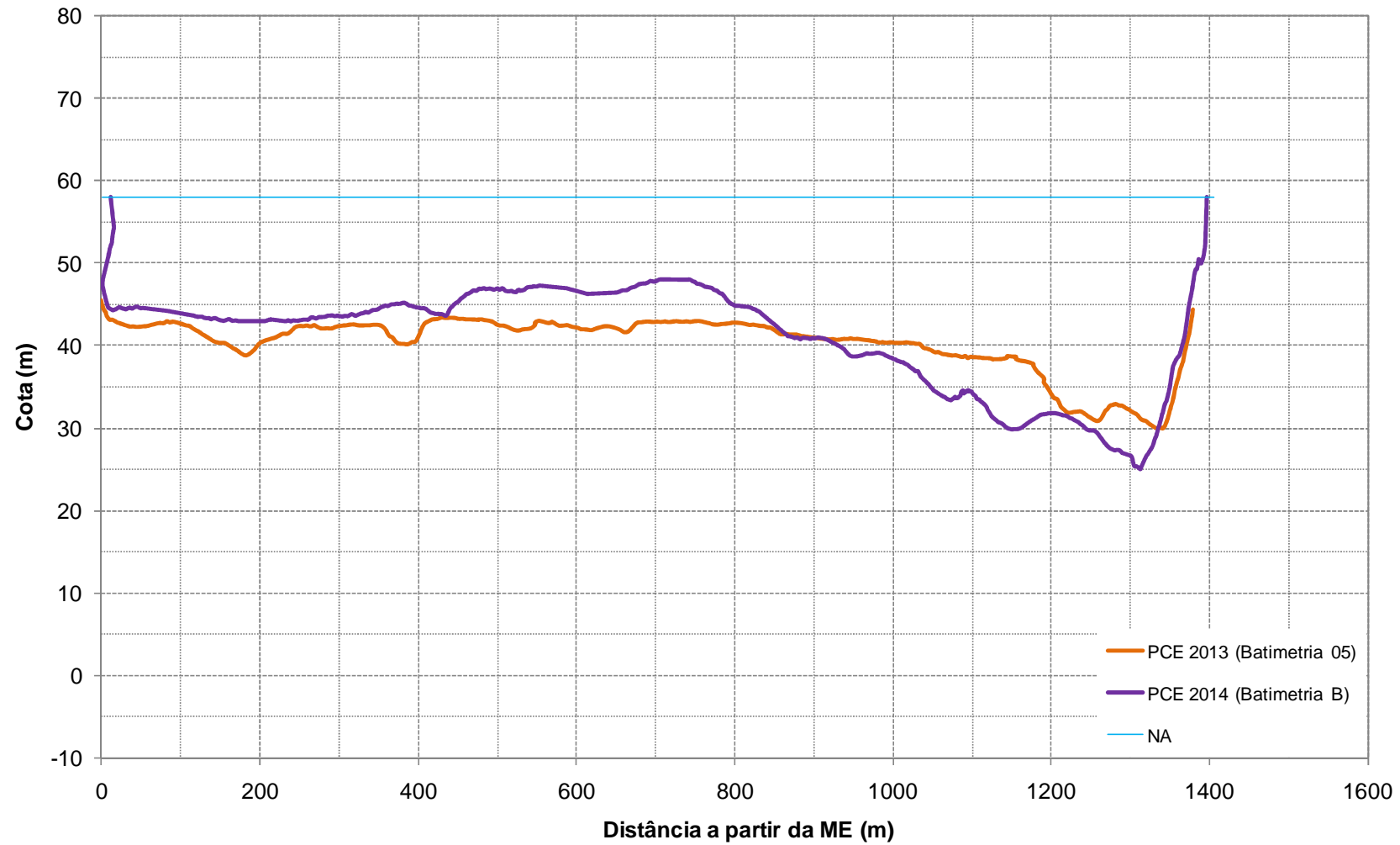


Figura 3.40.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 254,0



**Figura 3.41.**  
**Trajетória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 254,0**

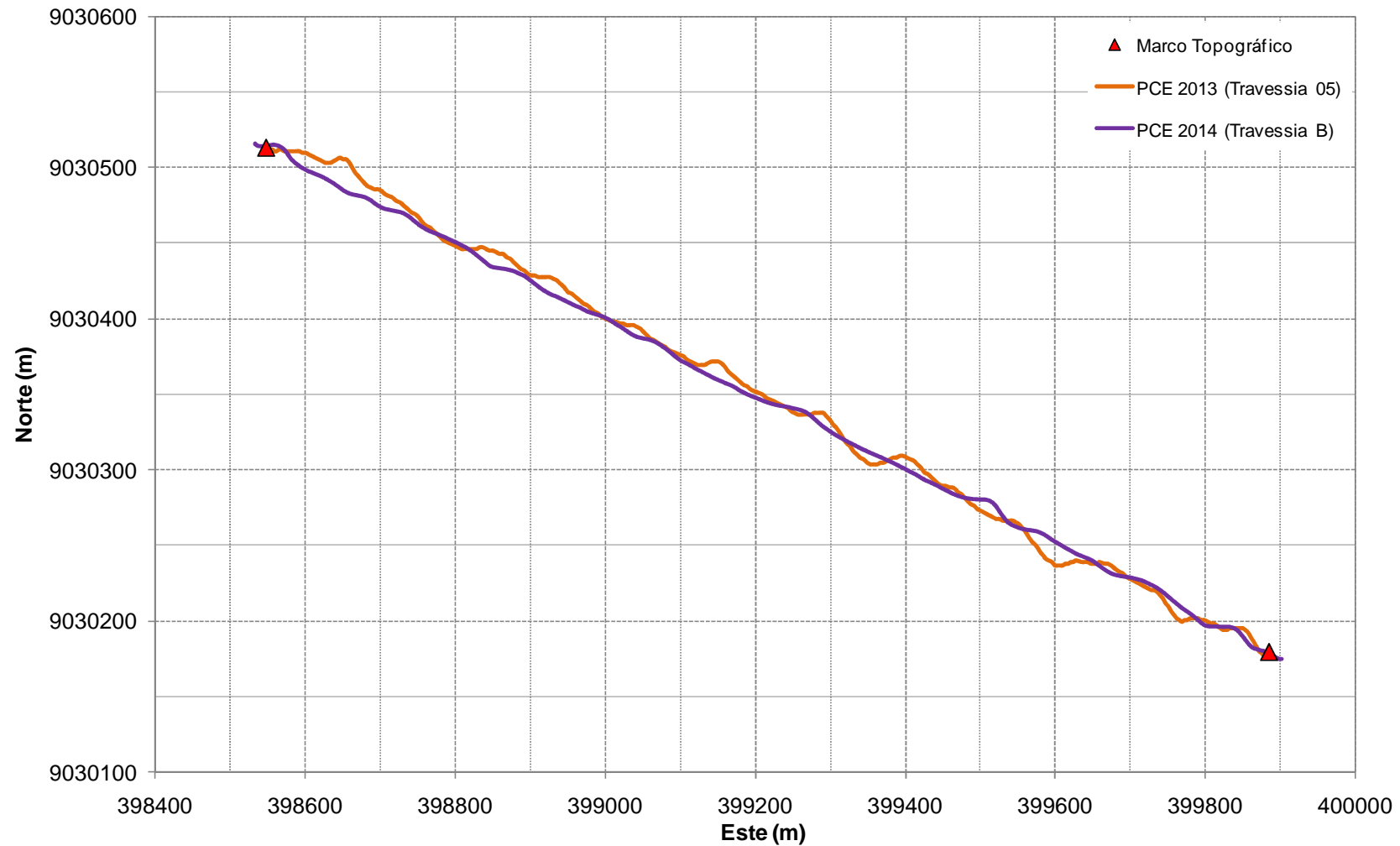
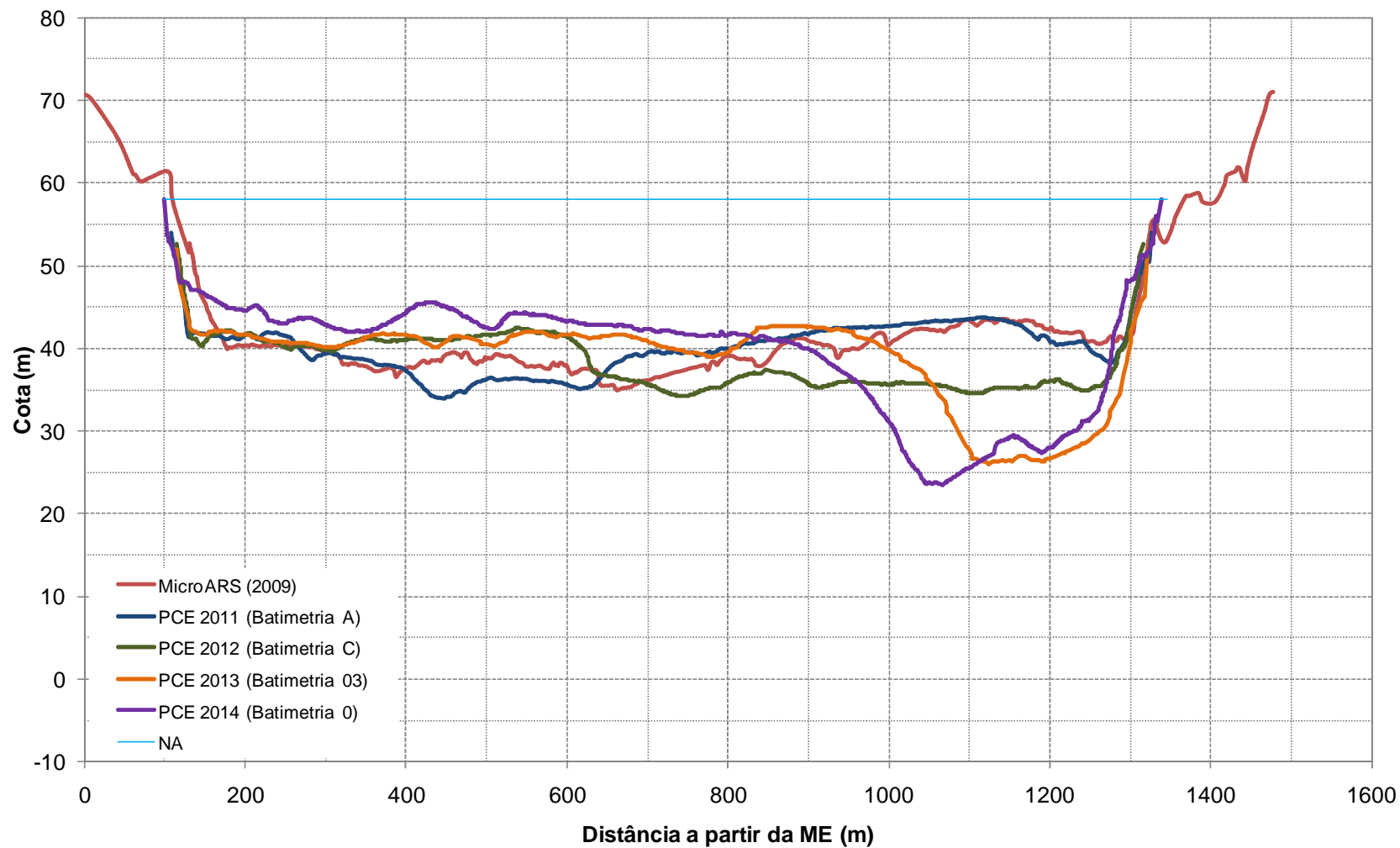


Figura 3.42.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 255,1



**Figura 3.43.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 255,1**

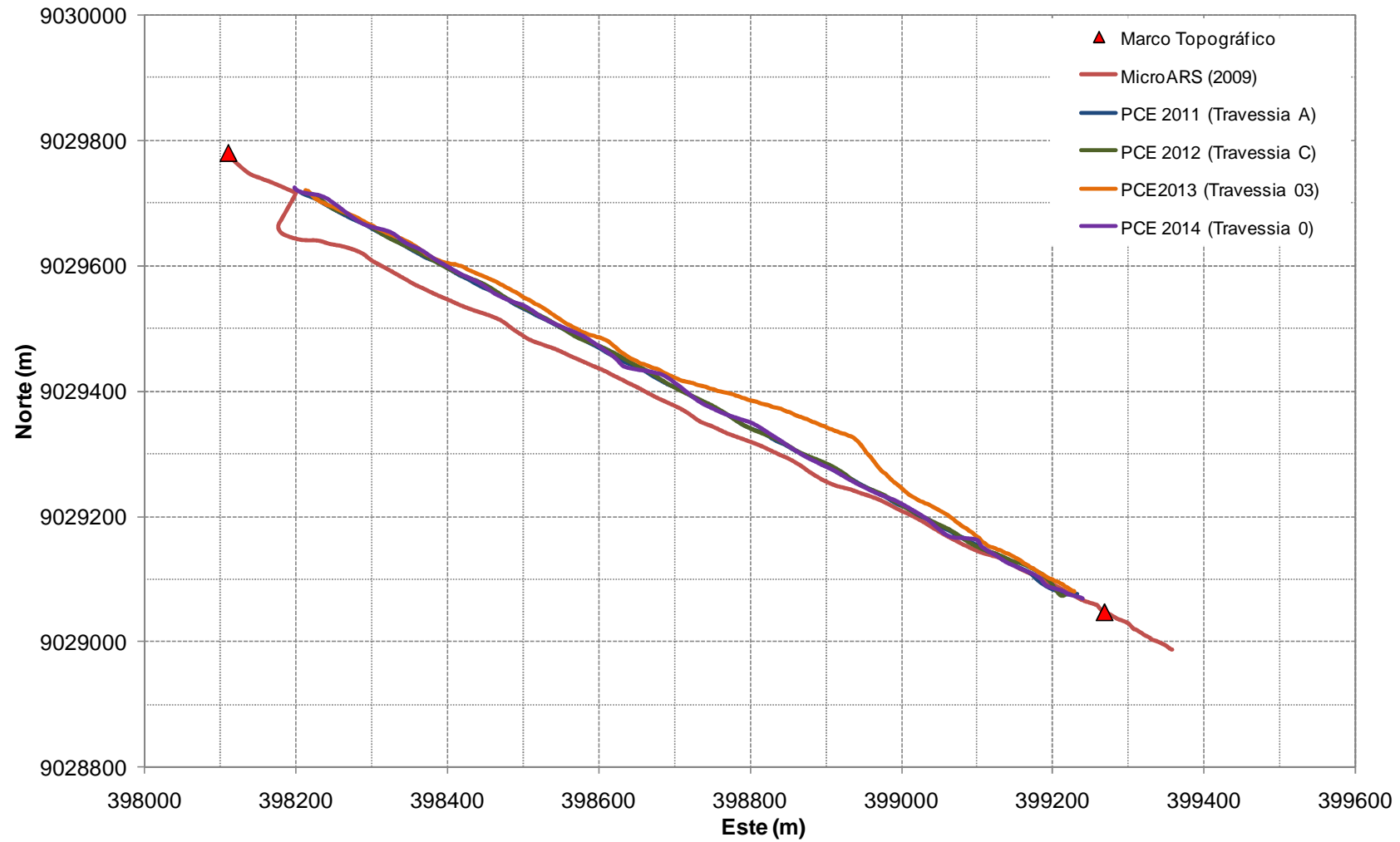




Figura 3.44.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 256,0

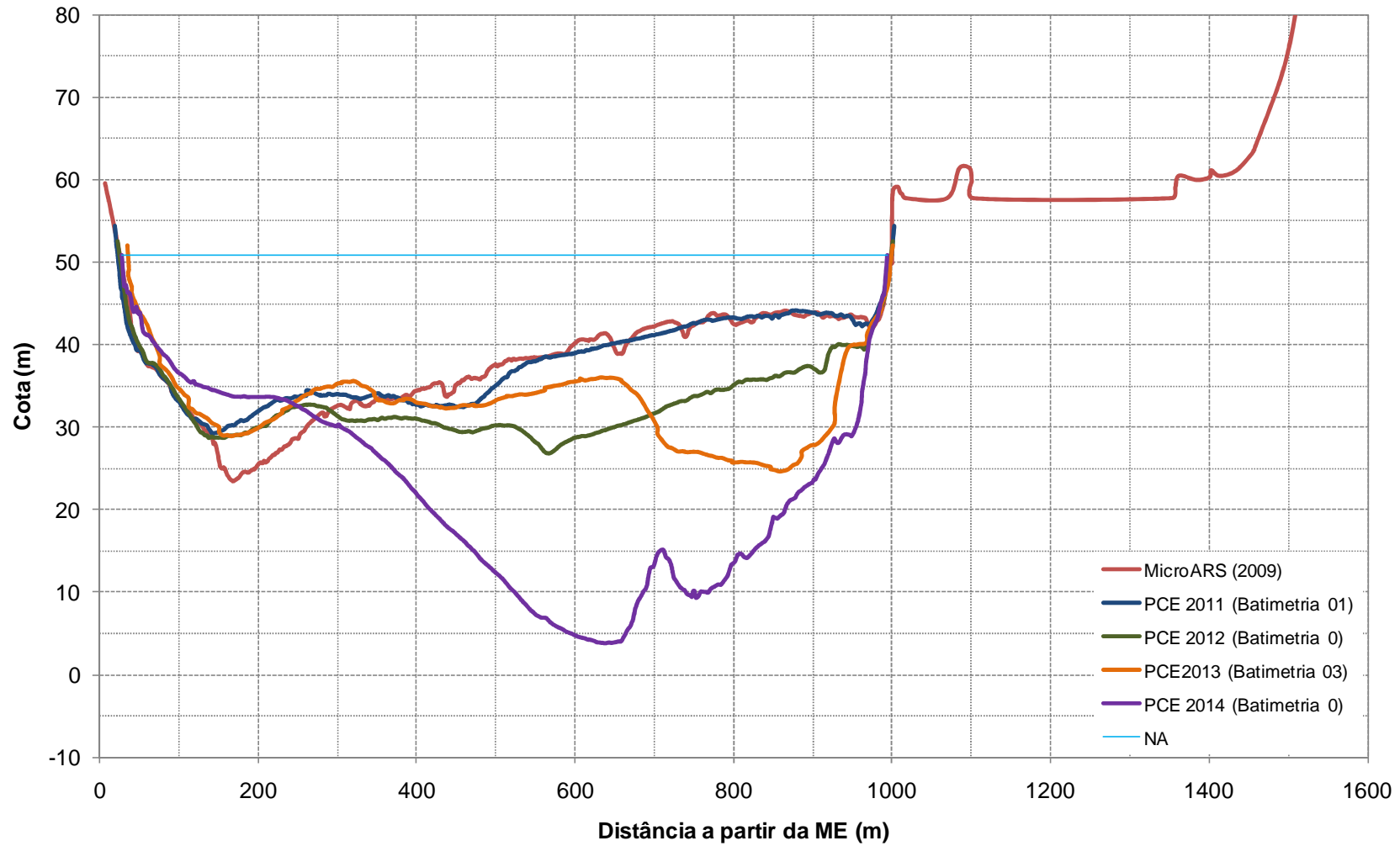


Figura 3.45.  
Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 256,0

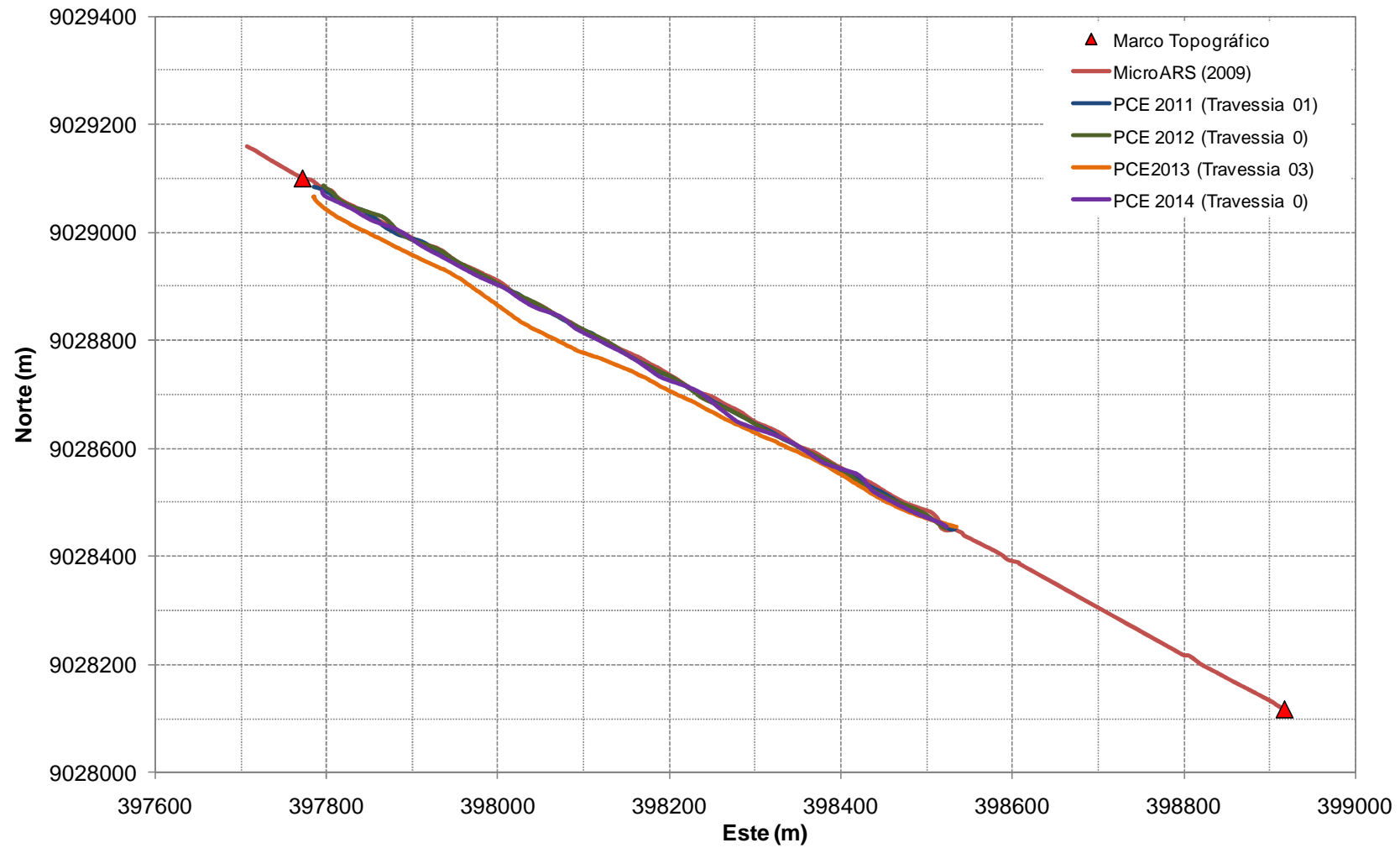


Figura 3.46.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 256,8

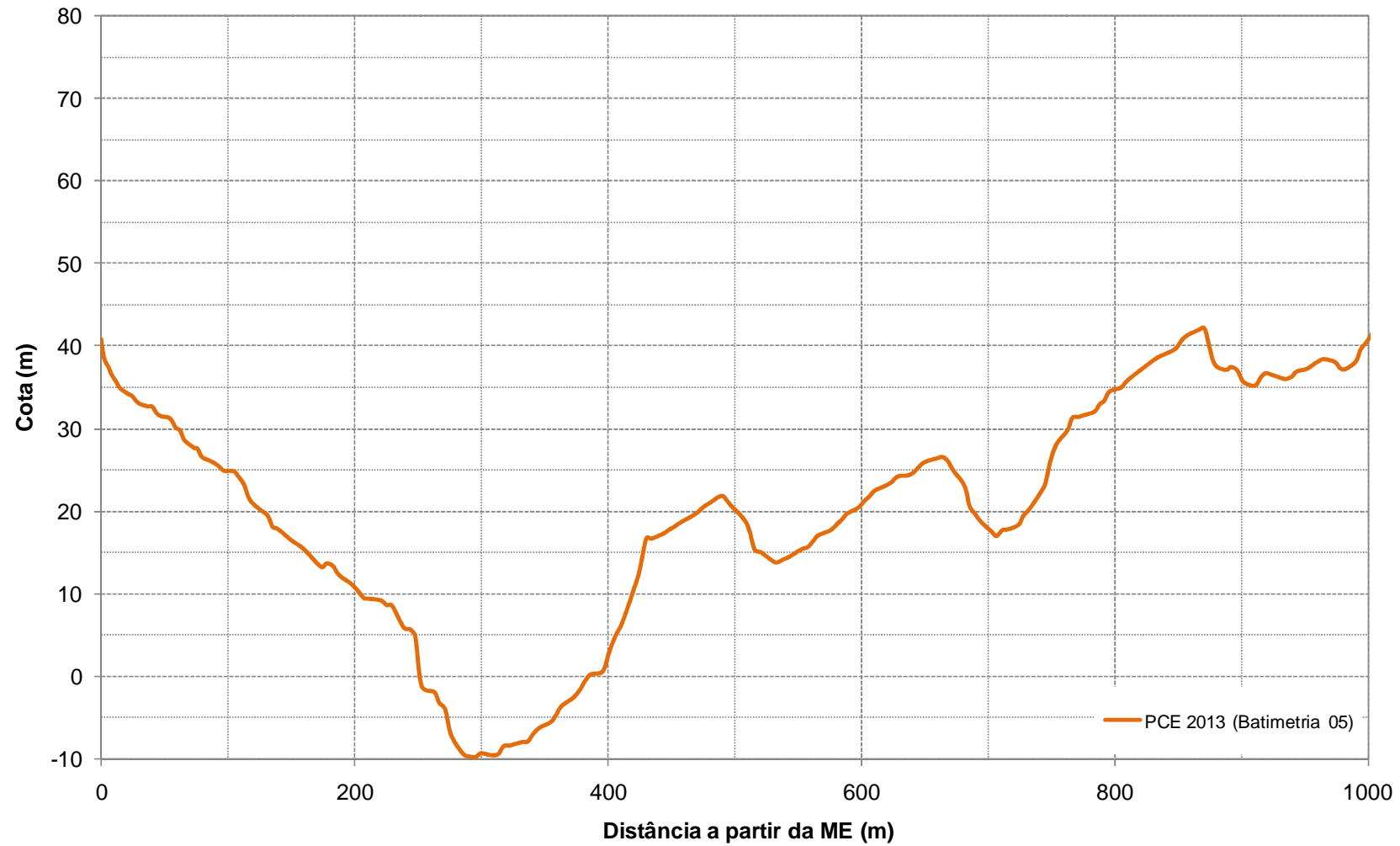


Figura 3.47.  
Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 256,8

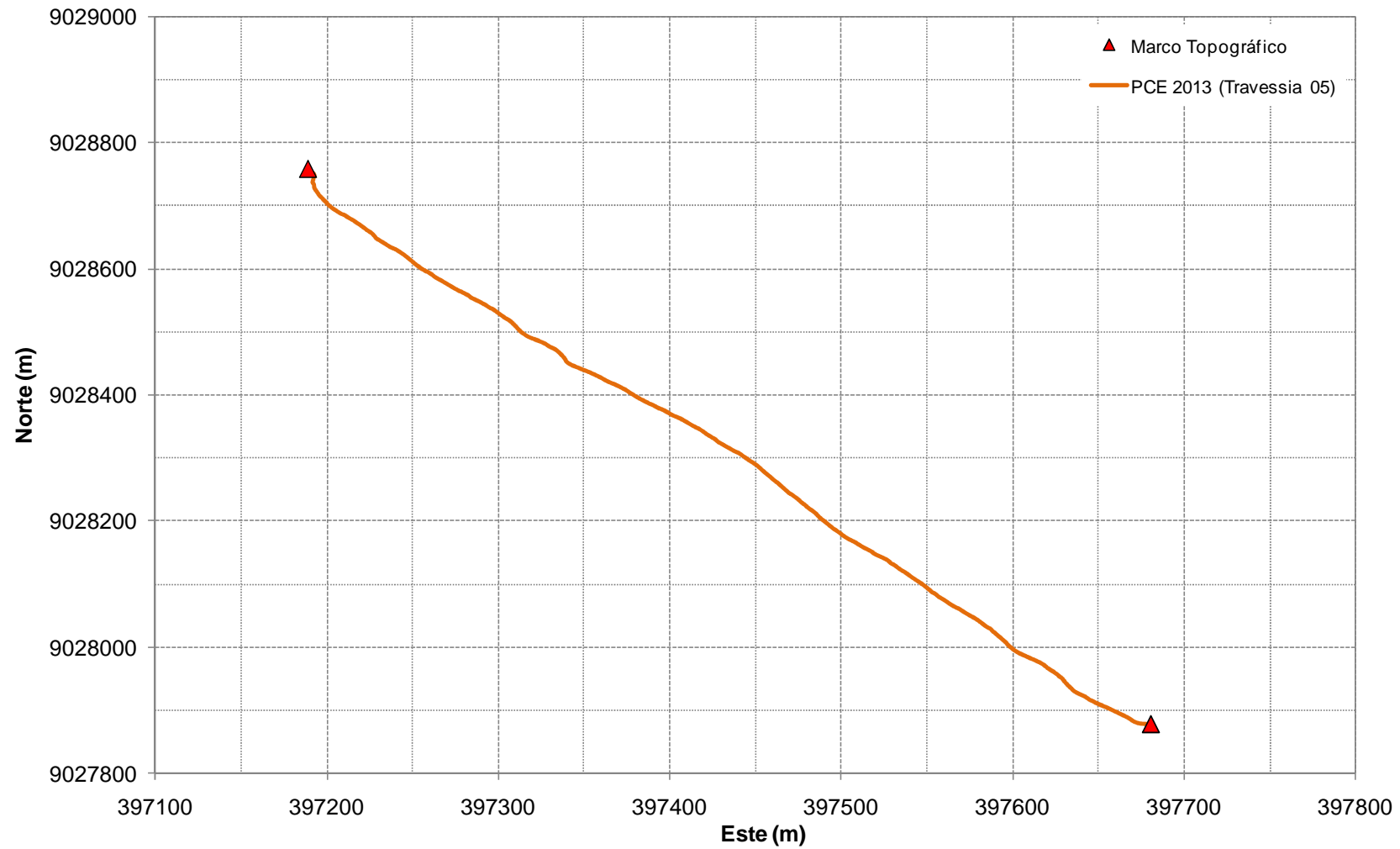
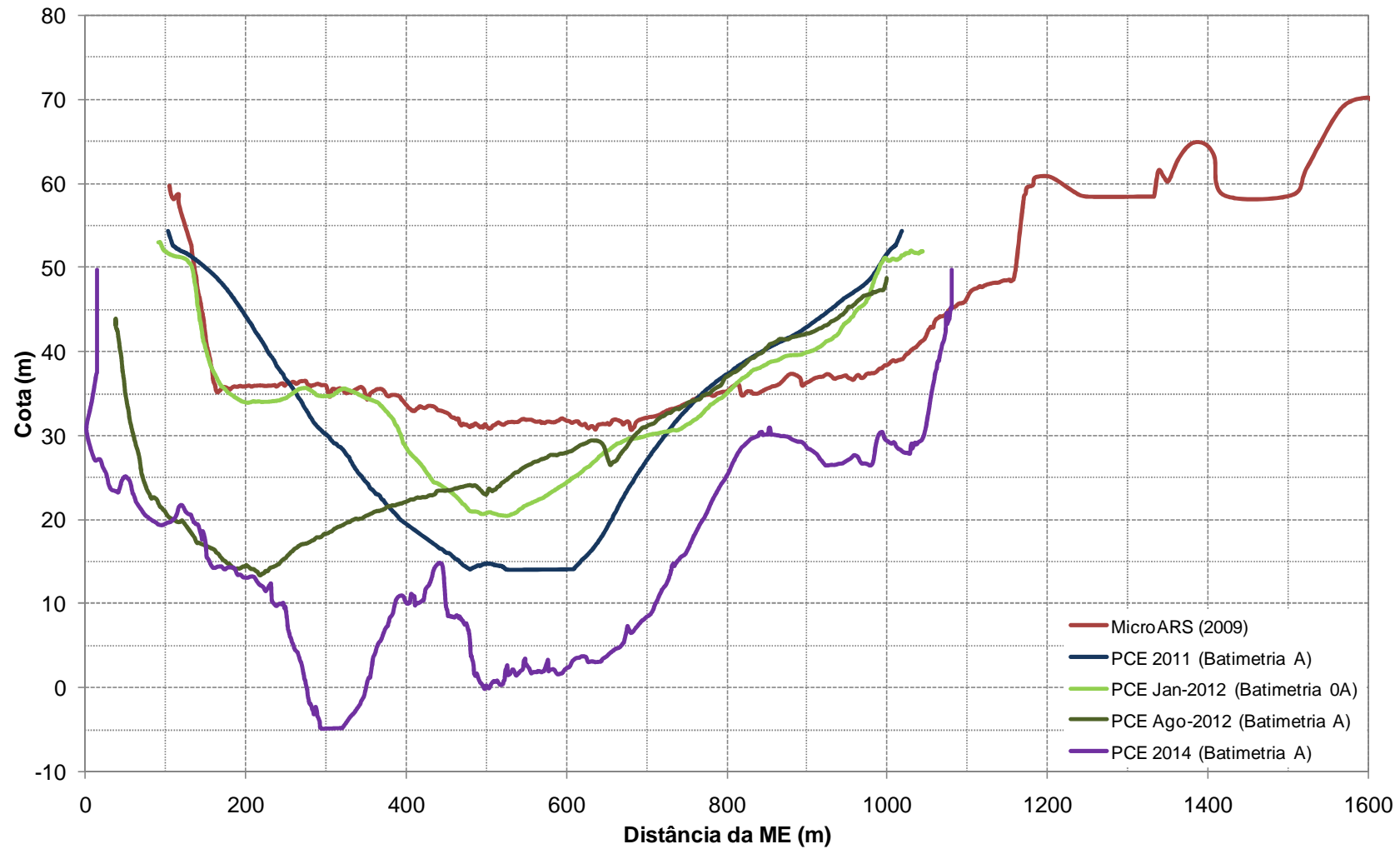
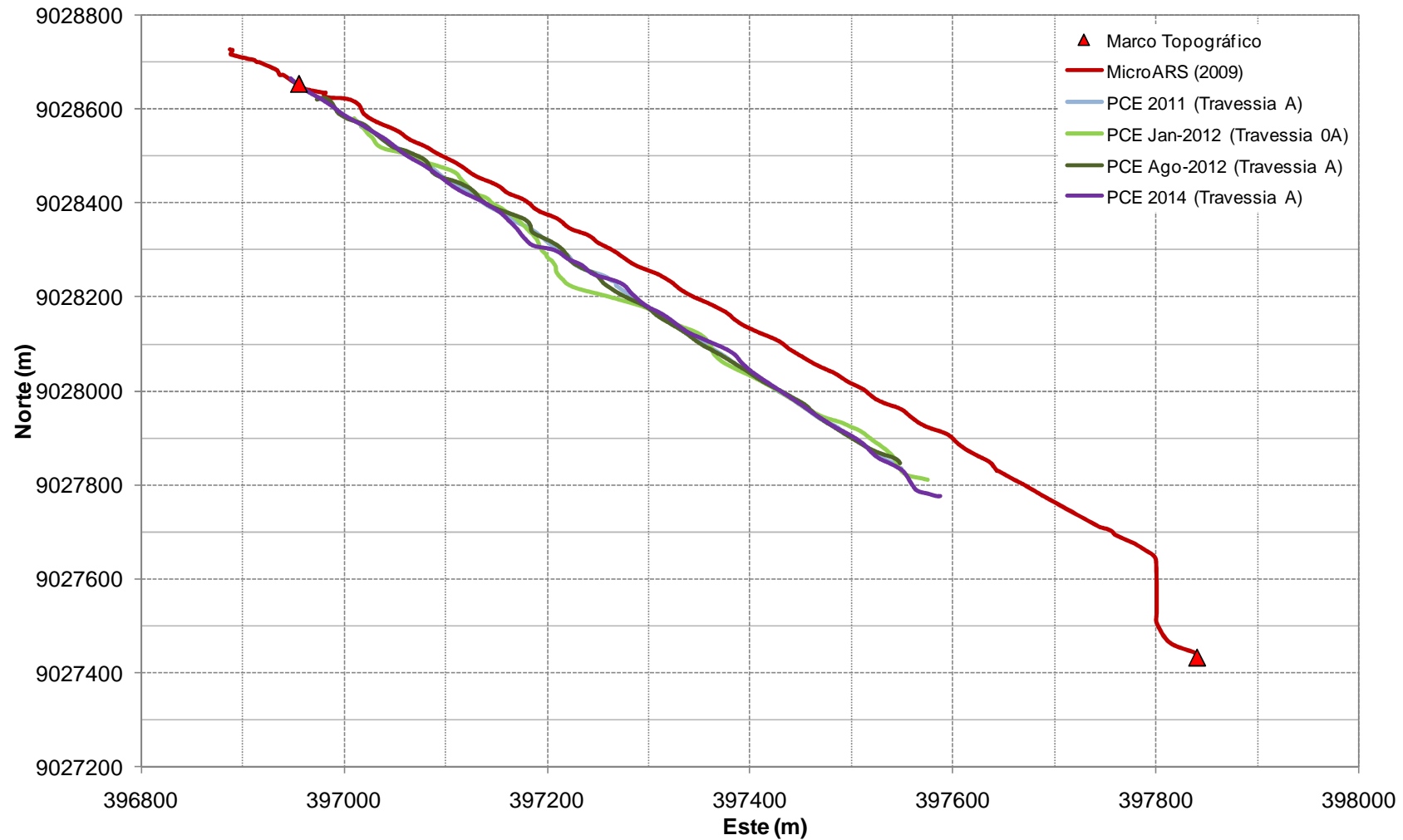


Figura 3.48.  
Perfil Topobatimétrico da Seção ST 257,0



**Figura 3.49.**  
**Trajetória da Embarcação Durante o Levantamento da Seção ST 257,0**



### 3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS ACERCA DAS SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS

No trecho do rio Madeira a jusante da UHE Santo Antônio até a localidade de Humaitá foram realizadas 23 seções topobatimétricas, o que corresponde, em média, a uma seção a cada 11,2 km. Adicionalmente, em cada local, foi realizada a superposição destes levantamentos com as campanhas pretéritas realizadas por FURNAS (2006) ou MicroARS (2009), além das medições batimétricas realizadas pela PCE em 2011, 2012, 2013 e 2014.

Os resultados desta atualização de registros batimétricos foram satisfatórios, ainda que devam realizar-se algumas considerações quanto à batimetria em diversas seções. A seguir são apresentados os comentários e observações levantados em relação a cada uma das seções.

A seção ST 0,0 caracteriza-se por ser estável, pois apresentou pequenas ou nenhuma alteração ao longo dos anos. Em 2014, o trecho central do canal sofreu um pequeno depósito de sedimentos de até 2m.

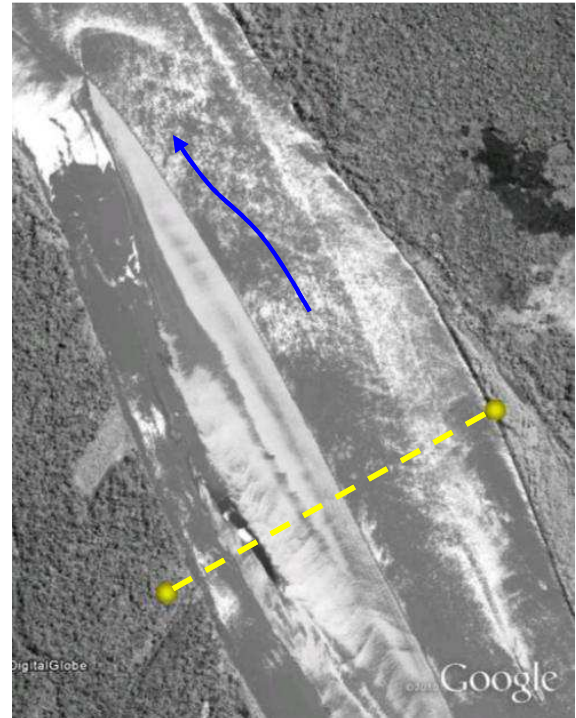
Houve poucas alterações na seção ST 31,1, as que ocorreram de 2009 a 2011, quando um banco de sedimentos localizado no eixo central foi erodido e sua margem direita assoreada. A partir de então, poucas mudanças foram percebidas.

A seção ST 51,6 apresentou um rebaixamento do leito do canal principal entre 2009 e 2011, porém entre 2011 e 2012 não mostrou mudanças significativas nas características da seção, apesar de se notar claramente o aumento no tamanho do banco de areia situado no centro da seção. Em 2013 apresentou novamente um leve rebaixamento, mas em 2014, o canal principal e o secundário foram assoreados em  $\pm 5$ m (Figura 3.6). A Figura 3.50 apresenta a localização do banco de areia para as imagens captadas em 28/06/2004 e 17/09/2008. A análise de imagens de satélite anteriores mostram a existência do mesmo já há varias décadas.

A seção ST 68,2 apresentou alterações batimétricas significativas entre 2006 e 2011, mas praticamente não houve mudanças quando avaliados os levantamentos de 2011 a 2013. Já em 2014, o leito foi significativamente erodido ( $> 5$ m), houve um leve deslocamento do talvegue e a margem esquerda foi assoreada (Figura 3.8).



**Figura 3.50.**  
**Localização do Banco de Areia nas Imediações da Seção ST 51,6 nas Imagens de Satélite de 2004 e 2008**



A seção ST 76,3 levantada em 2014 é similar às levantadas em 2011, 2012 e 2013, exceto pelo pequeno depósito formado a direita do talvegue. Observa-se que o levantamento de 2006 (FURNAS) está deslocado em relação às medições da PCE (Figura 3.10). Isto se deve à ocorrência de um intenso processo de erosão na margem esquerda do rio (Figura 3.51), que já recortou mais de 100 metros, conforme se observa nas linhas de margens de Jun/2004, Set/2008 e Jun/2009 (Figura 3.52). Nesta mesma figura está plotado o local onde FURNAS instalara o marco correspondente à seção em 2006, o qual se encontra hoje 55 metros dentro do canal do rio, e o local onde a PCE instalou o novo marco para utilizar como referência nos levantamentos batimétricos.

**Figura 3.51.**  
**Processo de Erosão de Margens na Seção ST 76,3**



**Figura 3.52.**  
**Erosão ao Longo da Margem Esquerda do Rio Madeira nas Imediações da ST 76,3**



A seção ST 101,3 levantada em 2012 é similar à verificada nos levantamentos anteriores, no entanto se destaca o crescimento do banco de areia situado próximo à margem direita do rio. A Figura 3.51. ilustra este banco de areia e, ainda, permite visualizar a presença de um pequeno braço de rio atrás da praia sobre o qual não foi realizado levantamento batimétrico. Em 2013 se verificou que um processo erosivo removeu consideravelmente os depósitos da margem direita da seção, mas que voltaram a sedimentar em 2014 (Figura 3.12).

A superposição das batimetrias de 2011 a 2013 na seção ST 113,8 não mostrou alterações morfológicas, ainda que estas apresentem um aprofundamento da calha em relação a batimetria de 2006 de FURNAS (Figura 3.14). Já em 2014 houve erosão de até 5m próximo à margem esquerda. Entre as possíveis causas destas mudanças pode-se citar o efeito provocado pela presença de diversos pedrais na calha do rio imediatamente a montante da seção, aliado à presença de uma ilha com numerosos bancos de areia, que naturalmente afetam a dinâmica hidráulica e sedimentológica do escoamento (Figura 3.54).

Em 2013, a forma da seção ST 129,8 permaneceu inalterada quando comparada com os anos anteriores, mas se percebe o rebaixamento do leito no talvegue e sedimentação da margem direita do rio (Figura 3.16). No entanto, em 2014 o leito voltou a ter uma morfologia mais próxima dos anos de 2011 e 2012. A comparação batimétrica desta



seção é interessante já que no centro do canal existe uma estrutura rochosa que atua como sinalizador (fixo) das alterações morfológicas no local.

**Figura 3.53.**  
**Banco de Areia Situado na Margem Direita da Seção ST 101,3**

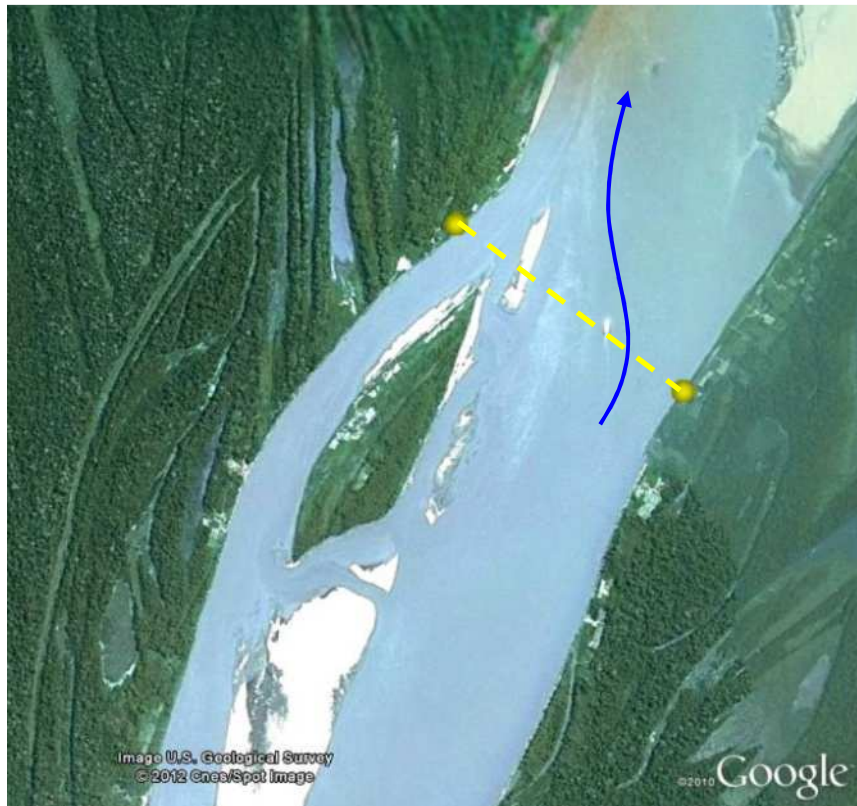


**Figura 3.54.**  
**Morfologia em Planta do Rio Madeira a Montante da Seção ST 113,8**



A seção ST 146,3 evidenciou alterações significativas na comparação das batimetrias de 2006 (realizada por FURNAS) e 2011. Porém, esta última permaneceu semelhante às levantadas em 2012, 2013 e 2014, com exceção de pequenas alterações no tamanho do banco de areia situado a jusante da ilha, levando a uma diminuição do braço de rio que escoava recostado na margem esquerda do Madeira. Em 2014, este banco de areia cresceu e esteve exposto durante o levantamento (Figura 3.18). Verifica-se que a região é propensa à deposição de sedimentos e formação de novos bancos de areia e ilhas (Figura 3.55).

**Figura 3.55.**  
**Morfologia em Planta do Rio Madeira nas Imediações da Seção ST 146,3**



A seção ST 157,1 não apresentou nenhuma mudança significativa na sua morfologia durante todos os cinco levantamentos realizados. Possui, portanto, uma morfologia estável.

A seção ST 165,8 mostrou uma tendência de rebaixamento do leito quando avaliadas as batimetrias de 2006 e 2011, sendo que entre 2011 e 2012 apresentou uma erosão aproximadamente uniforme de 3m ao longo de toda a seção transversal. Em 2013 verifica-se assoreamento de cerca de 2m na maior parte da seção, e em 2014 houve pouca mudança. A maior alteração foi a deposição de 5m de sedimentos em um curto trecho próximo à margem direita (Figura 3.22).

A seção ST 190,6 apresenta levantamentos batimétricos semelhantes aos de anos anteriores, com um leve assoreamento de 3m no talvegue (Figura 3.24). A margem esquerda dos levantamentos de 2012 e 2013 são distintas das demais, possivelmente devido à oscilação das trajetórias da embarcação naqueles anos.

O levantamento batimétrico da seção ST 201,6 não mostrou diferenças significativas entre 2011 e 2014, mas existem importantes mudanças em relação à batimetria realizada por FURNAS em 2006 (Figura 3.26). A principal causa consiste em que a região é propensa à deposição de sedimentos e formação de novas ilhas e bancos de areia, conforme se observa na morfologia em planta do trecho (Figura 3.56). A Figura 3.57. apresenta um

detalhe das imediações da ST 201,6 onde é possível intuir as mudanças morfológicas da seção, como por exemplo:(i) o aprofundamento da seção devido à diminuição da largura da seção;(ii) o deslocamento para a esquerda do eixo do canal de navegação, devido à presença de uma ilha a montante; e (iii) o aparecimento de uma barra de sedimentos na margem direita do rio que não existia na imagem de Maio/2000. O levantamento de 2014 evidencia a consolidação dessa barra de sedimentos (areia) próximo à margem direita.

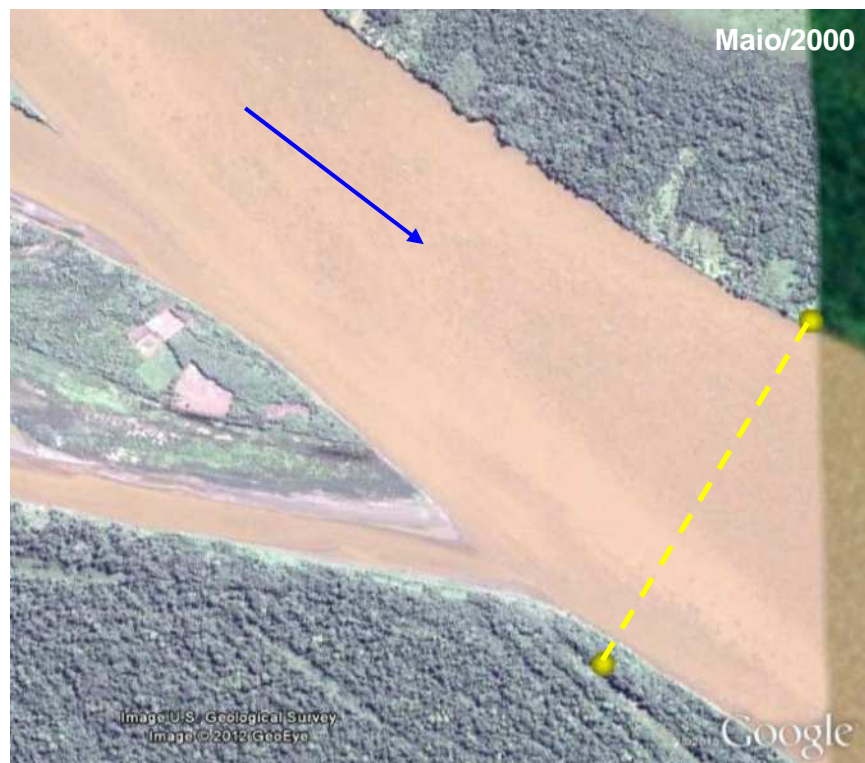
A principal modificação morfológica na seção ST 219,2 foi a erosão da sua margem esquerda em, aproximadamente, 8m de 2006 a 2011. A partir deste ano, a única alteração significativa foi a aparição de oscilações na batimetria de 2013. No entanto, o desenho da trajetória da embarcação evidencia que, neste ano, seu traçado se afastou do original. No levantamento de 2014 não houve alterações significativas.

**Figura 3.56.**  
**Morfologia em Planta do Rio Madeira nas Imediações da Seção ST 201,6**



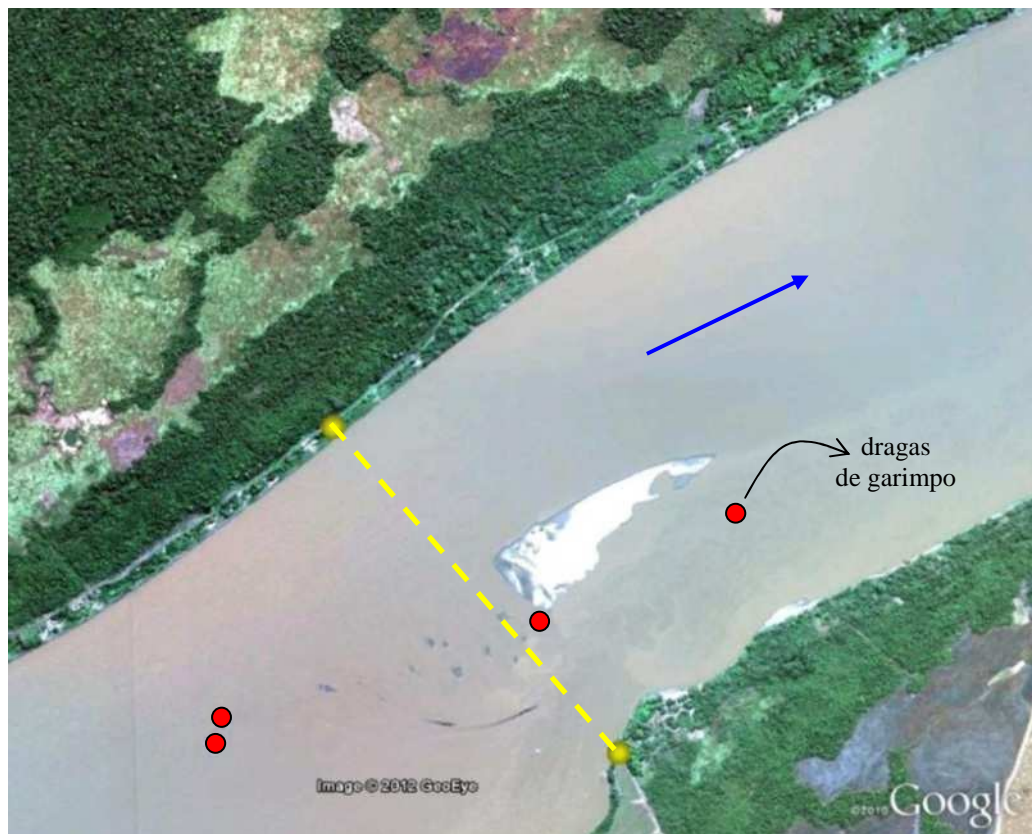


**Figura 3.57.**  
**Situação da Margem Direita do Rio Madeira em Maio/2000 e Junho/2011 na Seção ST 201,6**



A forma da seção ST 230,2 não sofreu alterações apesar das importantes mudanças morfológicas no centro da seção, onde o banco de areia diminuiu sensivelmente em 2012 (Figura 3.30). A análise das imagens de satélite para diferentes datas mostrou que a partir de 2006 começou uma intensa atividade garimpeira neste “depósito” de areia (Figura 3.58) e que, sazonalmente, pode alterar significativamente a morfologia do leito neste trecho (ver geoforma não natural do banco de areia). Nessa figura foram identificadas com pontos em vermelho a localização das dragas, divididas em 4 conjuntos, totalizando 20 dragas. Adicionalmente, se destaca que durante uma visita de campo realizada em Setembro/2014 foram contabilizadas acima de 40 dragas nesse trecho.

**Figura 3.58.**  
**Evidências da Atividade de Garimpo nas Imediações da Seção ST 230,2**



A seção ST 242,6 não apresentou nenhuma alteração significativa na calha, com exceção de um pequeno processo erosivo (gradativo) na margem direita do rio (Figura 3.32).

A seção ST 250,8 começou a ser monitorada em 2013 e sua análise é de grande importância devido à ponte da rodovia BR-319, localizada 500m a jusante da seção. Comparando os dois levantamentos, nota-se zonas alternadas de acumulação de sedimentos e de erosão. A alteração mais significativa foi o assoreamento da margem direita, onde houve depósitos de até 12m. Tais mudanças podem estar relacionadas às obras em andamento nas imediações da ponte ou, inclusive, ao remanso causado pela ponte.

A forma da seção ST 251,9 é semelhante à levantada em anos anteriores, principalmente na seu talvegue e na margem direita. Na margem esquerda, houve uma erosão gradual de 2011 a 2013, mas que se reconstituiu parcialmente em 2014 (voltando aos níveis de 2012). Isto evidencia claramente a dinâmica do rio na busca pelo equilíbrio hidrossedimentológico (Figura 3.36).

A seção ST 253,0 também teve seu monitoramento iniciado em 2013. Aparenta uma morfologia estável, com pequenas alterações entre 2013 e 2014, com zonas alternadas de erosão e assoreamento de no máximo 3m.

A seção ST 254,0 está localizada na curva que o rio Madeira faz nas imediações do Porto Cai N'Água, na cidade de Porto Velho. A partir dos registros de 2013 e 2014 se percebe um aprofundamento do talvegue próximo à margem direita, e um processo de sedimentação do eixo central à margem esquerda. Este é um comportamento típico do leito em trechos curvelíneos, devido à interferência da curva do rio sobre sua hidrodinâmica.

A superposição das batimetrias das seções ST 255,1 e ST 256,0 evidenciou mudanças morfológicas relevantes em relação aos levantamentos pretéritos, principalmente próximo da margem direita. Na ST 255,1 se verificou erosão máxima do leito da ordem de 5-7 metros até 2012, excavando um novo talvegue em 2013 mediante um processo local de erosão de até 8 metros. Em 2014 se verificou um pequeno aprofundamento do talvegue, mas principalmente uma ampliação do talvegue encostado na margem direita. No centro do rio e na margem esquerda a tendência foi de assoreamento, porém com uma intensidade menor (Figura 3.42).

Na ST 256,0 a erosão foi aproximadamente 10 metros até 2012 na metade direita da seção transversal, sendo que em 2013 evidenciou deposição no centro da seção e uma marcada erosão na margem direita que levou à excavação de um novo talvegue (de forma semelhante ao ocorrido na seção ST 255,1). Em 2014 constatou-se uma alteração morfológica intensa em toda a seção, com um aprofundamento do leito de até 30 metros em relação à batimetria original de 2009, conforme se observa na Figura 3.44.

Em relação às seções ST 256,8 e ST 257,0 cabem algumas considerações pois constituem os primeiros locais de monitoramento a jusante da UHE Santo Antônio e, neste sentido, repercutem com maior ênfase as mudanças morfológicas provocadas pela operação da usina. Isto é evidente na Figura 3.48, onde se percebem as importantes alterações que ocorreram a partir de 2009, inclusive na extensão da largura da seção transversal devido à dragagem da margem esquerda (a jusante da casa de máquinas GG2 e GG3).

O levantamento de 2009, apesar de apresentar um desvio na trajetória do levantamento de aproximadamente 80m próximo da margem direita (Figura 3.49), representa a situação no leito do rio anterior às obras da usina. Já o levantamento de 2011 mostrou alterações significativas na batimetria, sendo que dentre as possíveis causas foram consideradas, em menor ou maior grau, as seguintes:



- i) a construção das ensecadeiras no braço direito do rio Madeira, na ilha do Presídio, provocou a concentração do escoamento no canal principal. Isto pode ter provocado o aprofundamento da calha fluvial no trecho a jusante da cachoeira de Santo Antônio;
- ii) o fechamento deste braço de rio gerou também condições propícias para a sedimentação logo a jusante destas ensecadeiras, o que levou à formação de uma barra localizada paralela à margem direita, conforme se observa na Figura 3.59, diminuindo assim a largura efetiva da seção transversal;
- iii) as mudanças registradas na margem esquerda da seção podem atribuir-se a alterações provocadas pelas atividades no canteiro de obras da usina, entre as quais a dragagem do igapó, já que a disposição do material dragado foi realizada diretamente na calha do rio.

O levantamento de Janeiro/2012 mostrou uma situação transitória, na qual o rio apresenta uma tendência à recuperação do equilíbrio sedimentológico mediante a deposição de sedimentos no canal principal. No entanto, o levantamento de Agosto/2012 evidencia uma mudança radical na forma da seção em relação aos levantamentos anteriores, com um deslocamento do talvegue para a margem esquerda do rio. Cabe esclarecer que estas mudanças ocorreram exclusivamente durante o período de cheia de 2012 (fevereiro-abril) quando a maior parte do escoamento se concentrou no vertedouro principal (com um elevado grau de energia para dissipar), provocando uma alteração na direção do escoamento (as linhas de corrente ensaiam um desenho em diagonal, atravessando o rio de uma margem para a outra) e ocasionando as mudanças morfológicas verificadas na seção ST 257,0 (na margem esquerda) e nas seções ST 256,0 e ST 255,1 (na margem direita).

No serviço realizado em 2013 não foi possível levantar a seção ST 257,0 por razões de segurança, tendo em conta as oscilações do nível d'água observadas. Por esta razão o levantamento foi realizado na seção ST 256,8, localizada 200m a jusante.

Nessa nova seção, muito próxima da ST 257,0, se observa o canal da margem esquerda atingindo profundidades cerca de 20m abaixo daquela observada no levantamento de 2012 na seção 257,0, o que parece confirmar o efeito de erosão local provocado pelo vertedouro principal, neste trecho do rio mais próximo da barragem.

No levantamento de 2014 as condições hidrodinâmicas permitiram o levantamento da seção ST 257,0, de modo que não se fez necessário medir a seção ST 256,8. Nesta seção, de forma semelhante ao verificado na seção ST 256,0, constatou-se uma alteração morfológica intensa em toda a seção, com um aprofundamento do leito de até 35 metros em relação à batimetria original de 2009, conforme consta na Figura 3.48.

As erosões verificadas nas seções ST 256,0 e ST 257,0 são marcantes, mas é importante lembrar que a cheia ocorrida durante o ano hidrológico 2013/2014 foi extraordinária, e que estas seções estão situadas na área de influência direta do vertimento da UHE Santo Antônio.

**Figura 3.59.**  
**Morfologia em Planta do Rio Madeira nas Imediações das Seções ST 255,1, ST 256,0 e 257,0**



## **4. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL DO LEITO PARA ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO**

#### 4.1. INTRODUÇÃO

Após o levantamento topobatimétrico das seções transversais do rio Madeira, a equipe de hidrossedimentometria realizou a coleta de material do leito para análise granulométrica e acompanhamento da evolução granulométrica no tempo.

Constam a seguir a descrição dos procedimentos metodológicos de coleta e análise das amostras do leito e os seus respectivos resultados.

#### 4.2. AMOSTRAGEM DE SEDIMENTOS DO LEITO

Normalmente a amostragem de sedimentos do leito é realizada para caracterizar a distribuição granulométrica dos sedimentos susceptíveis de serem transportados pelo fundo da corrente e que, eventualmente, podem ser colocados em suspensão.

Segundo a literatura (Julien, 1995; Carvalho *et al.*, 2000), um dos equipamentos mais adequados para operar a grandes profundidades e com elevadas velocidades é o modelo US BM-54, do tipo de penetração vertical. Entretanto, o Projeto HiBAM (Hidrologia da Bacia Amazônica) tentou medir com esse tipo de amostrador diversas campanhas de medição nos grandes rios amazônicos, não tendo sucesso. Nessas circunstâncias, a mola do dispositivo de coleta do sedimento disparava ocasionalmente, antes que o amostrador chegasse ao leito do rio. Possivelmente, isto ocorreu devido às condições extremas do escoamento, com elevadas velocidades e profundidades.

Para contornar essa situação, foi proposta a utilização de um outro tipo de amostrador, denominado de raspagem horizontal, de construção simples e com uma sacola de tecido para armazenagem do material coletado, conforme se observa na Figura 4.1 e Figura 4.2.

O equipamento é constituído por um cilindro de aço de ~0,40 m de comprimento e 0,10 m de diâmetro, com bordas cortantes, suspenso pelo cabo, com peso total de ~15 kg e capacidade de coleta de material de 7,5 kg. Na parte posterior do amostrador há uma sacola de tecido que deixa passar a água, mas retém o material sedimentar. A sacola é presa ao amostrador por meio de braçadeiras. A corrente de ferro não é imprescindível, no entanto outorga maior peso ao amostrador diminuindo os efeitos de deriva durante o procedimento de amostragem.



**Figura 4.1.**  
**Amostrador de Sedimentos do Leito do**  
**Tipo de Raspagem Horizontal**



**Figura 4.2.**  
**Exemplo do Material Coletado no**  
**Amostrador**



#### **4.3. PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM**

Durante o procedimento de amostragem, o equipamento é jogado na corrente e, logo que pousa no leito, é arrastado pelo fundo do rio de acordo com a deriva do barco, coletando o material passível de ser transportado por arraste, na camada superior do leito. Durante a amostragem, o encarregado desta tarefa deve permanecer alerta ao risco de o amostrador prender no leito. Neste caso é necessário ter comprimento suficiente de corda para manobrar e/ou soltar o equipamento.

Também é importante que o motor do barco permaneça ligado, em ponto morto. Dessa forma, caso o amostrador se prenda no leito, o piloto pode rapidamente reagir e encaminhar o barco no sentido contrário ao escoamento. Se mesmo assim o amostrador ficar preso no fundo do rio, a corda deve ser cortada, de forma a não comprometer a segurança da equipe de medição.

O tempo de amostragem é variável, dependendo das condições do escoamento, e deve possibilitar a obtenção da quantidade mínima necessária de material sedimentar para as análises granulométricas (entre 0,5 e 1 kg).

Ao longo do trecho a jusante da UHE Santo Antônio até Humaitá foram considerados 19 locais para amostragem de sedimentos do leito (coincidentes com as seções topobatimétricas). A coleta de material para análise granulométrica do rio Madeira foi realizada em uma vertical por seção, localizada na metade (50%) da largura total da seção transversal.

Após a retirada do material pela boca do equipamento, a amostra foi colocada em sacolas plásticas (reforçadas) e identificadas com o nome do local da amostragem, número de vertical e data da amostragem.

#### 4.4. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL DO LEITO

A determinação da distribuição granulométrica dos sedimentos do leito é realizada mediante o método de peneiramento a seco, com agitação mecânica e manual da série de peneiras com malhas padronizadas (Figura 4.3.).

Os resultados das análises granulométricas são apresentados pelas porcentagens de material dos diversos diâmetros, a partir dos quais são traçadas as curvas granulométricas.

**Figura 4.3.**  
**Secagem e Peneiramento (agitação mecânica) das Amostras de Material do Leito**



#### 4.5. RESULTADOS

Apresenta-se a seguir os resultados da granulometria do leito das seções transversais, em comparativo com os resultados dos anos anteriores (2009, 2011, 2012 e 2013). Na metodologia de amostragem dos primeiros levantamentos, a coleta foi realizada em 3 verticais, a 25%, 50% e 75% da largura da seção. A partir do levantamento realizado em 2012, a amostragem passou a ser realizada em apenas um vertical, a 50%. Com isso, a comparação de granulometria para cada ano acontecerá somente com as verticais centrais.

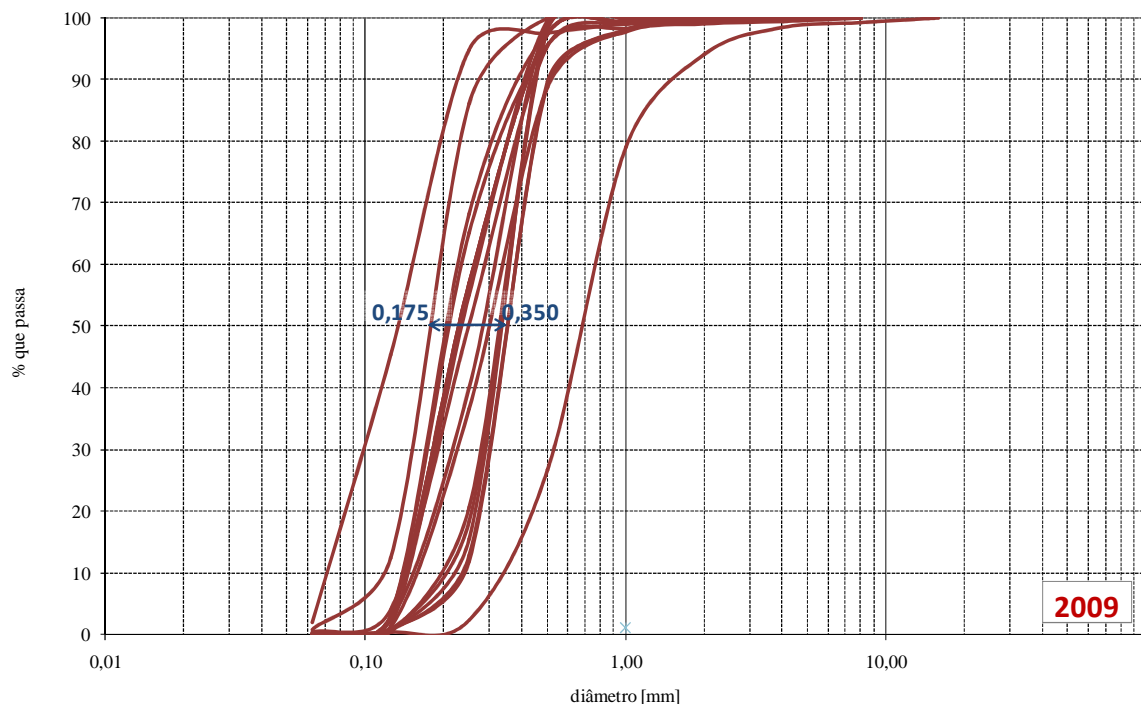
As amostras coletadas e analisadas em 2014 estão listadas na Tabela 4.1. Nas novas seções batimétricas (ST 250,8, ST 253,0 e ST 254,0) não foi realizada a coleta de amostras do leito.

**Tabela 4.1.**  
**Amostras de Material do Leito Coletadas no Rio Madeira em 2014**

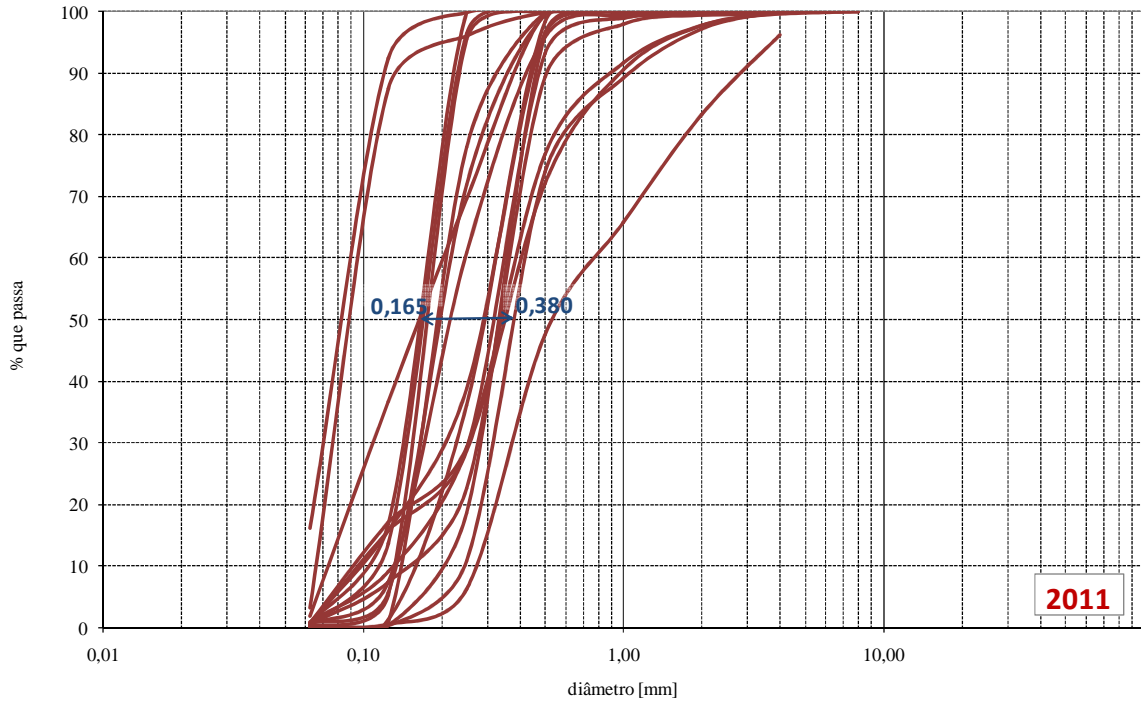
| Seções a Jusante da UHE Santo Antônio |       |
|---------------------------------------|-------|
| 0,0                                   | 165,8 |
| 31,1                                  | 190,6 |
| 51,6                                  | 201,6 |
| 68,2                                  | 219,2 |
| 76,3                                  | 230,2 |
| 101,3                                 | 242,6 |
| 113,8                                 | 251,9 |
| 129,8                                 | 255,1 |
| 146,3                                 | 256,0 |
| 157,1                                 |       |

Para ter uma idéia geral da evolução da granulometria ao longo do tempo foi realizada uma comparação da totalidade das curvas granulométricas das seções, para os anos 2009, 2011, 2012, 2013 e 2014 (Figura 4.4. a Figura 4.8).

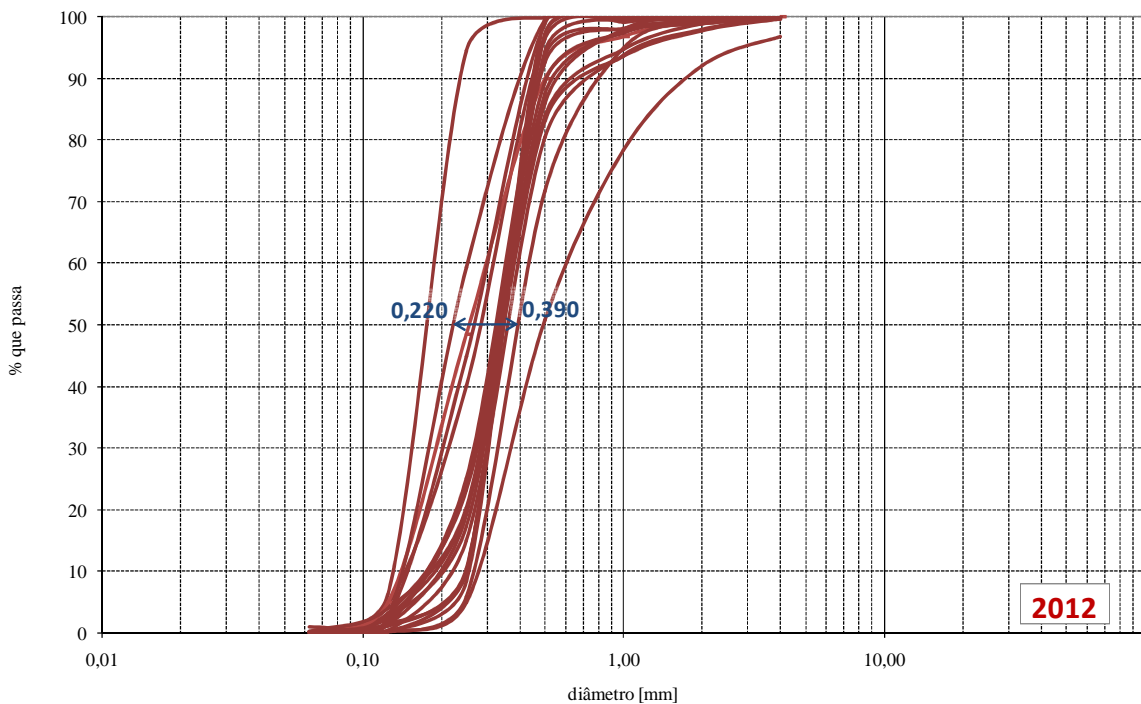
**Figura 4.4.**  
**Curvas Granulométricas das Amostras Coletadas em 2009 nas Seções Localizadas a Jusante da UHE Santo Antônio**



**Figura 4.5.**  
**Curvas Granulométricas das Amostras Coletadas em 2011 nas Seções Localizadas a Jusante da UHE Santo Antônio**

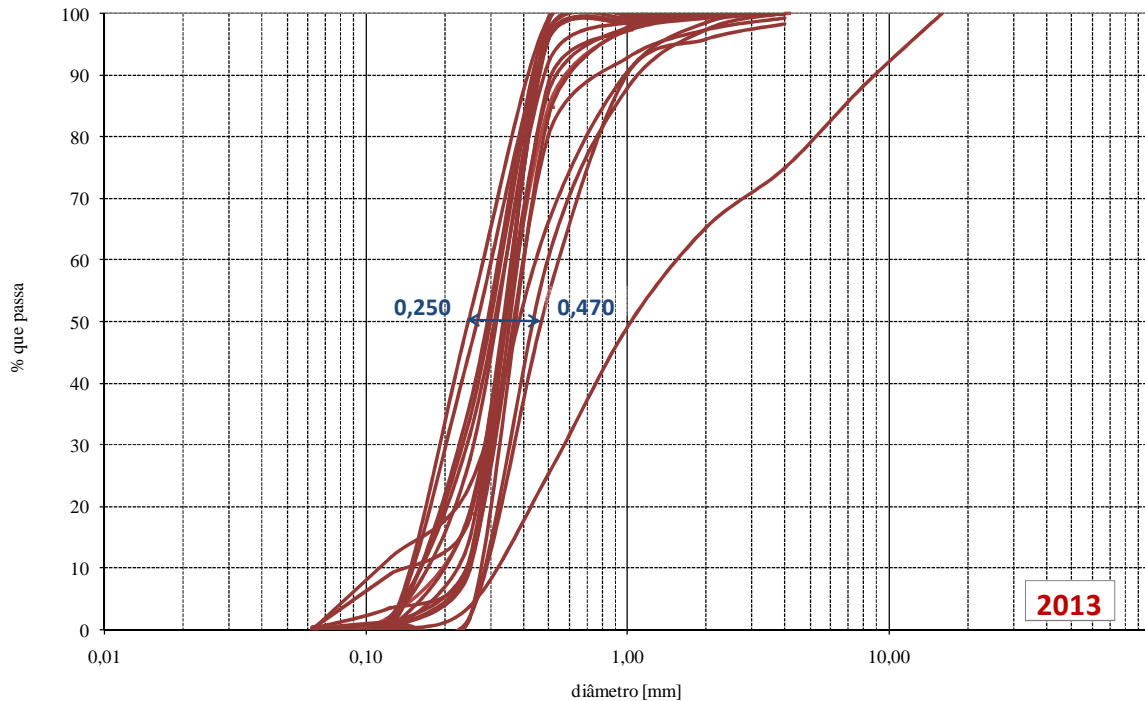


**Figura 4.6.**  
**Curvas Granulométricas das Amostras Coletadas em 2012 nas Seções Localizadas a Jusante da UHE Santo Antônio**

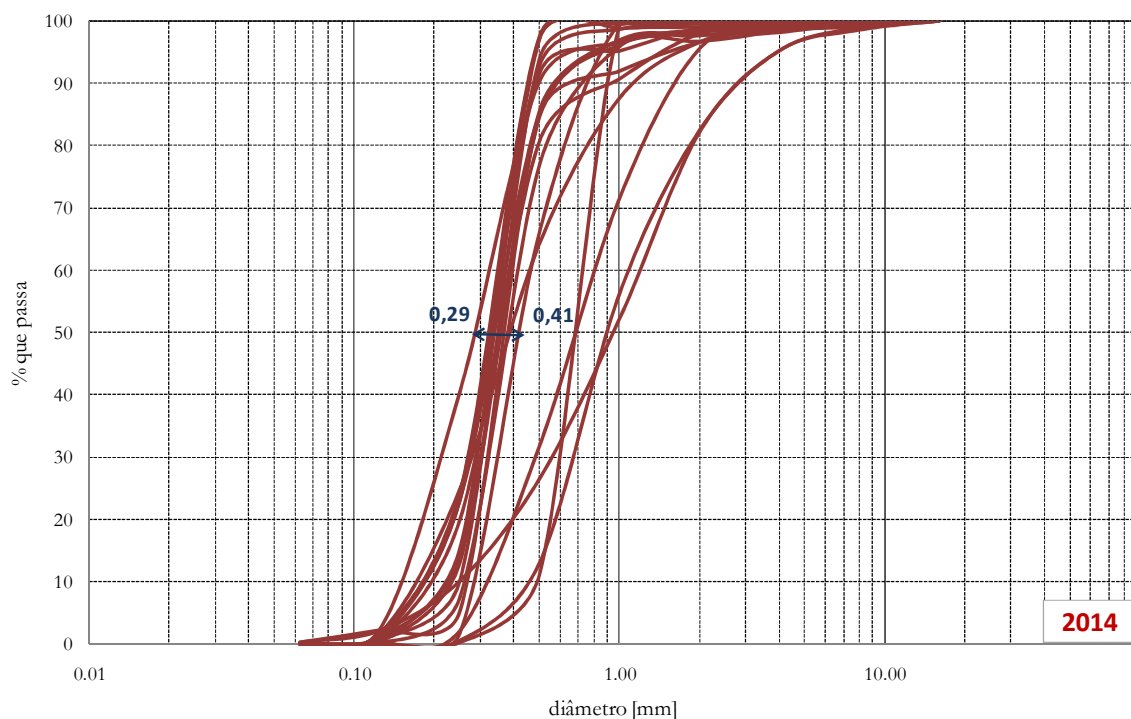




**Figura 4.7.**  
**Curvas Granulométricas das Amostras Coletadas em 2013 nas Seções Localizadas a Jusante da UHE Santo Antônio**



**Figura 4.8.**  
**Curvas Granulométricas das Amostras Coletadas em 2014 nas Seções Localizadas a Jusante da UHE Santo Antônio**



A análise das figuras anteriores permitiu verificar que ao longo de cada trecho existe uma certa variabilidade nos diâmetros que compõem as curvas granulométricas, mas que estes diâmetros não evidenciaram grandes variações ao longo dos anos estudados (2009, 2011, 2012, 2013 e 2014), conforme se observa na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2.**  
**Variação Temporal do Diâmetro Médio do Sedimento ao Longo do Rio Madeira a Jusante da UHE Santo Antônio**

| Ano  | Diâmetro (mm) |
|------|---------------|
| 2009 | 0,175 – 0,350 |
| 2011 | 0,165 – 0,380 |
| 2012 | 0,220 – 0,390 |
| 2013 | 0,250 – 0,470 |
| 2014 | 0,290 – 0,410 |

Para a análise da variação do diâmetro médio ( $d_{50}$ ) foi usada como referência a faixa com maior densidade de curvas (as setas nos gráficos indicam as faixas consideradas), supondo que este intervalo representa o comportamento padrão do material que compõe o leito. Desta forma, não foram consideradas as curvas da ST 31,1 (2009 e 2011), ST 68,2 (2014), ST 190,6 (2014), ST 255,1 (2014) e da ST 256,0 (2012 a 2014) por estarem com diâmetros superiores ao intervalo padrão; nem as curvas da ST 68,2 (2011 e 2012) e ST 213,8 (2009), por estarem com diâmetros menores do que o intervalo padrão.

A análise da Tabela 4.2 permite visualizar que na amostragem do último ano houve um aumento do limite inferior do diâmetro médio do sedimento no trecho situado a jusante da UHE (chegando a valores entre 0,29 e 0,41 mm). Apesar do gradativo incremento do diâmetro médio nos últimos anos, essas variações não trazem conclusões significativas sobre granulometria do trecho estudado, pois alterações desta grandeza podem ser naturais no rio Madeira. Neste sentido, é interessante apresentar as variações temporais do diâmetro médio do sedimento do leito nas estações fluviométricas que fazem parte do Programa de Monitoramento Hidrossedimentológico do rio Madeira (Figura 4.9).

Nesta figura se observa a variação temporal do diâmetro médio, a partir de Março/2009, nas estações Jusante Cachoeira Madeira (situada a montante do reservatório da UHE Jirau), UHE Santo Antônio Abunã (localizada no reservatório da UHE Jirau), Jusante Caldeirão do Inferno (situada no reservatório da UHE Santo Antônio) e UHE Santo Antônio Porto Velho, São Carlos e UHE Santo Antônio Humaitá (localizadas a jusante da usina). Cabe aclarar que as medições granulométricas em Abunã se encerraram em Outubro/2013 (quando ficou evidente o efeito de remanso da UHE Jirau) e foram transferidas para a estação Jusante Cachoeira Madeira, localizada mais a montante.

Analisando o conjunto com todas as curvas se percebe a variabilidade do diâmetro médio do sedimento (as vezes, com traços sazonais), com valores máximos do  $d_{50}$  em Porto

Velho (0,48 mm) e mínimos em São Carlos (0,09 mm). Se na análise considerarmos as diferentes estações individualmente, se identifica uma variação ao longo do ano de aproximadamente 0,25 mm entre o  $d_{50}$  máximo e o mínimo. Este valor será utilizado como referência (limite) para identificar os locais com uma variação acentuada do material que compõe o leito do escoamento.

Na sequência se apresentam os gráficos com as curvas granulométricas das 19 seções transversais analisadas, contendo dados que correspondem aos anos 2009 e 2011 a 2014 (Figura 4.10 a Figura 4.28), e as observações que surgem da análise das mesmas.

Foram identificadas diferenças significativas no diâmetro do sedimento nas seções ST 31,1, ST 68,2, ST 157,1, ST 165,8, ST 190,6, ST 255,1 e ST 256,0 (que correspondem a Figura 4.11, Figura 4.13, Figura 4.19 a Figura 4.21, Figura 4.27 e Figura 4.28, respectivamente).

A seção ST 31,1 apresenta um decréscimo progressivo do  $d_{50}$  de aproximadamente 0,25mm entre 2009 e 2012, recuperando-se em 2013 e mantendo-se praticamente estável em 2014. O levantamento batimétrico de sua seção transversal não apresentou mudanças significativas que possam relacionar-se às alterações granulométricas.

Os sedimentos do leito da seção ST 68,2 tornaram-se progressivamente mais graúdos de 2011 a 2013, porém em 2014 voltaram a apresentar um  $d_{50}$  mais próximo do valor da primeira medição. Entre 2013 e 2014 a alteração foi significativa, passando de um diâmetro mediano característico de areia média para muito fina. Em relação à batimetria da seção, houve um significativo rebaixamento do talvegue.

Na seção ST 157,1 o  $d_{50}$  sofreu uma diminuição de 2011 a 2012, porém voltou ao seu valor inicial em 2013. Já em 2014, o diâmetro característico passou de uma areia fina para média. Dada a estabilidade morfológica desta seção, conclui-se que esta variação da curva granulométrica poderia ser um processo natural da seção.

Na seção ST 165,8 as maiores modificações ocorreram entre os anos de 2009 a 2012. Desde então, a granulometria do leito apresenta-se estável, assim como a maior parte da batimetria da seção transversal.

A seção ST 190,6 apresentou um refinamento significativo do  $d_{50}$  de 2009 a 2011. Até 2013, o aumento do diâmetro característico foi gradativo, voltando ao seu valor da medição inicial. Em 2014, os sedimentos do leito tornaram-se mais graúdos, com um  $d_{50}$  característico de areias grossas. As variações batimétricas no local de medição não justificam a importante mudança granulométrica registrada.

As curvas granulométricas das seções ST 255,1 e ST 256,0 mostram um aumento significativo do diâmetro característico ( $d_{50}$ ) nos últimos anos, que certamente está relacionado às importantes variações morfológicas (aprofundamento) verificadas nestas seções.

Concluindo, houve poucas alterações significativas na granulometria que compõe o leito do rio Madeira no trecho a jusante do reservatório da UHE Santo Antônio, com exceção

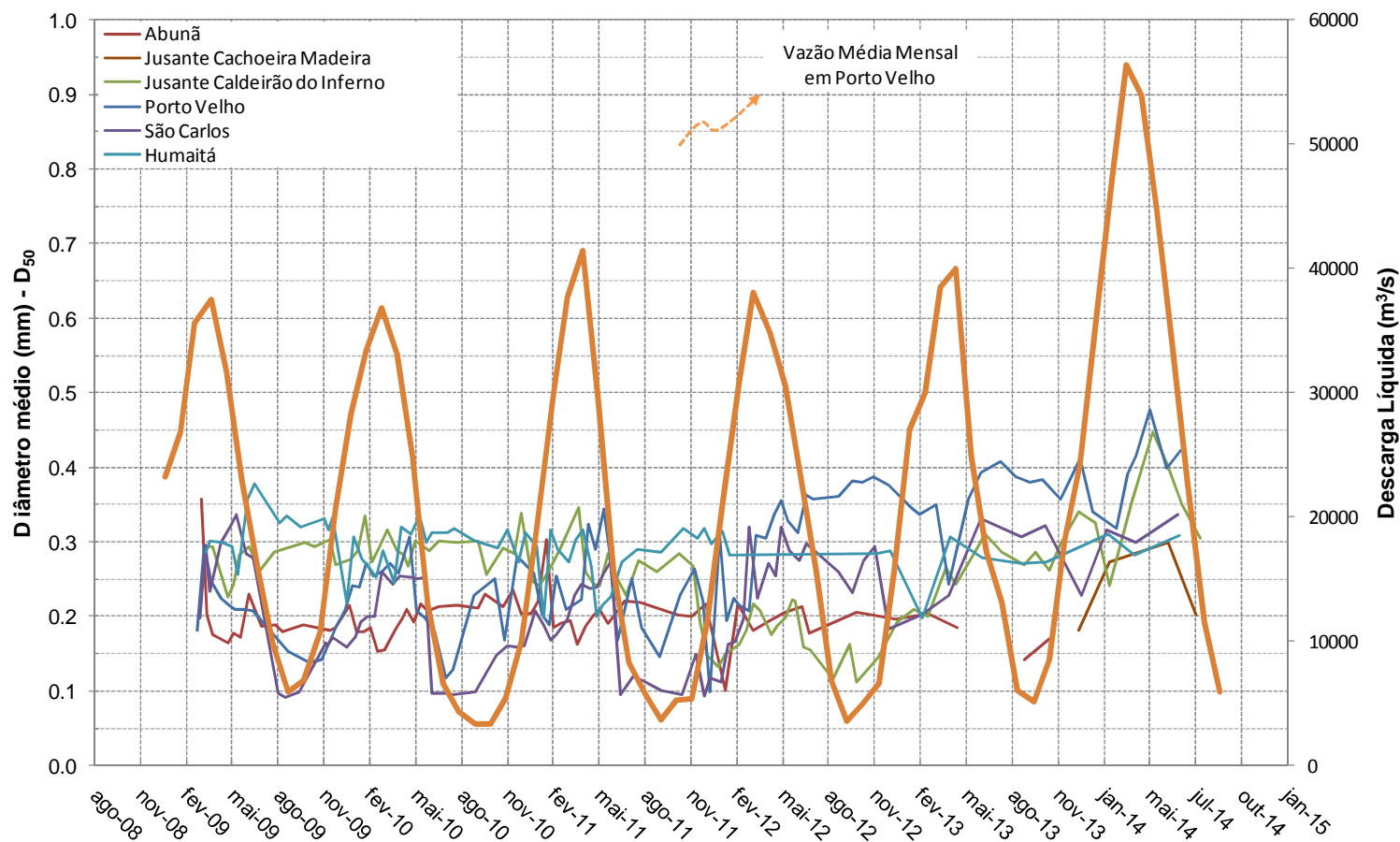
**4ª Etapa do Programa de Levantamentos e Monitoramento Hidrossedimentológico  
do Rio Madeira e do Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

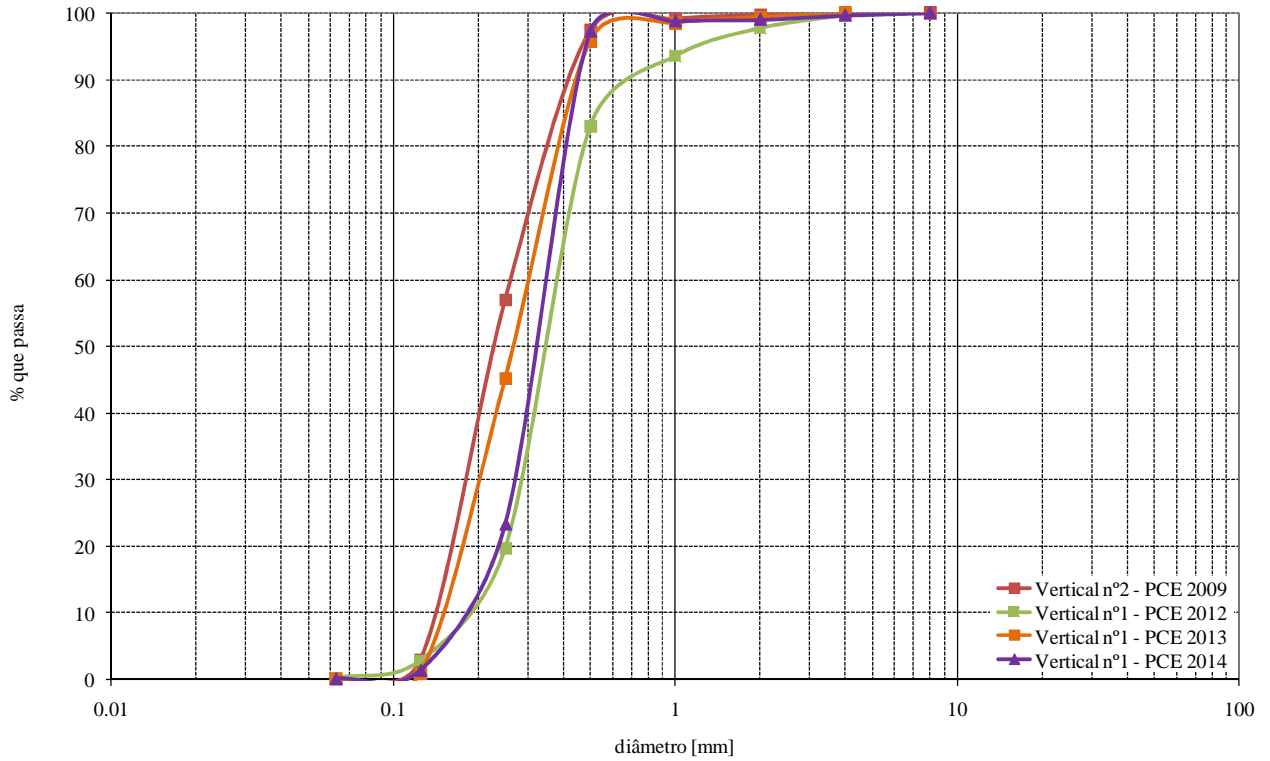
das seções localizadas imediatamente a jusante da barragem, nas quais foi possível identificar tendências ao aumento do diâmetro médio (devido à erosão do leito no trecho).

Por último, cabe reiterar que este rio transporta uma elevada carga de sedimentos em suspensão e por arraste, que acabam provocando importantes variações locais e sazonais da granulometria do leito. Por este motivo se considera fundamental continuar o acompanhamento das batimetrias e granulometrias do leito nas seções transversais objeto do Programa de Monitoramento Hidrossedimentológico do Rio Madeira.

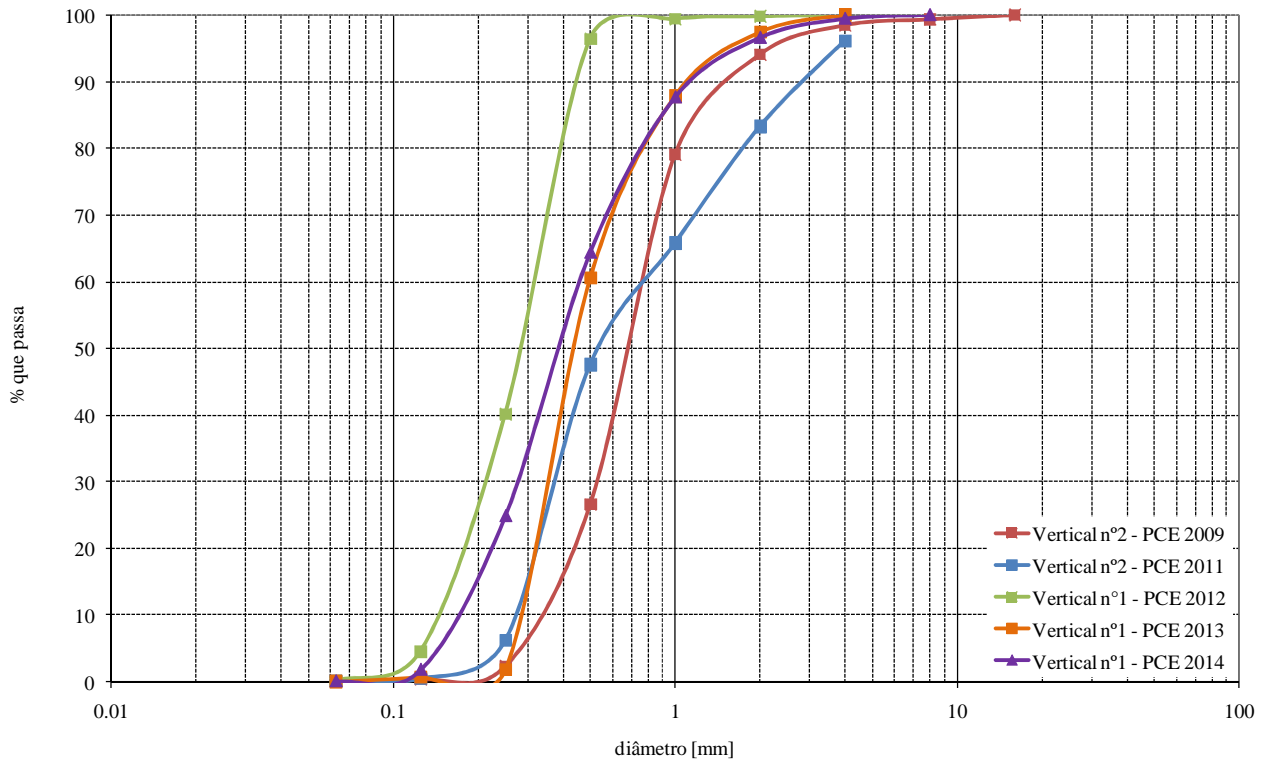
**Figura 4.9.**  
**Varição Temporal do Diâmetro Médio do Sedimento do Leito nas Estações Hidrométricas que Compõem o Programa de Monitoramento Hidrossedimentológico do Rio Madeira**



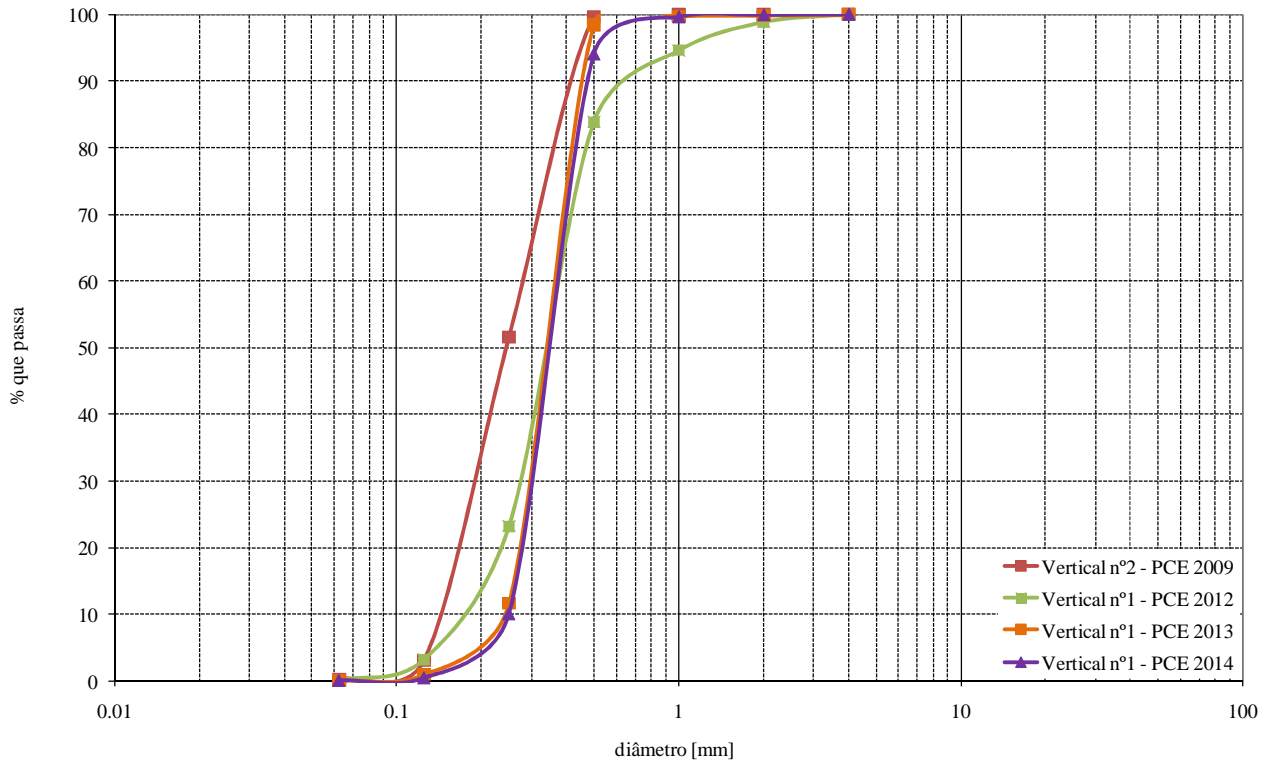
**Figura 4.10.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 0,0**



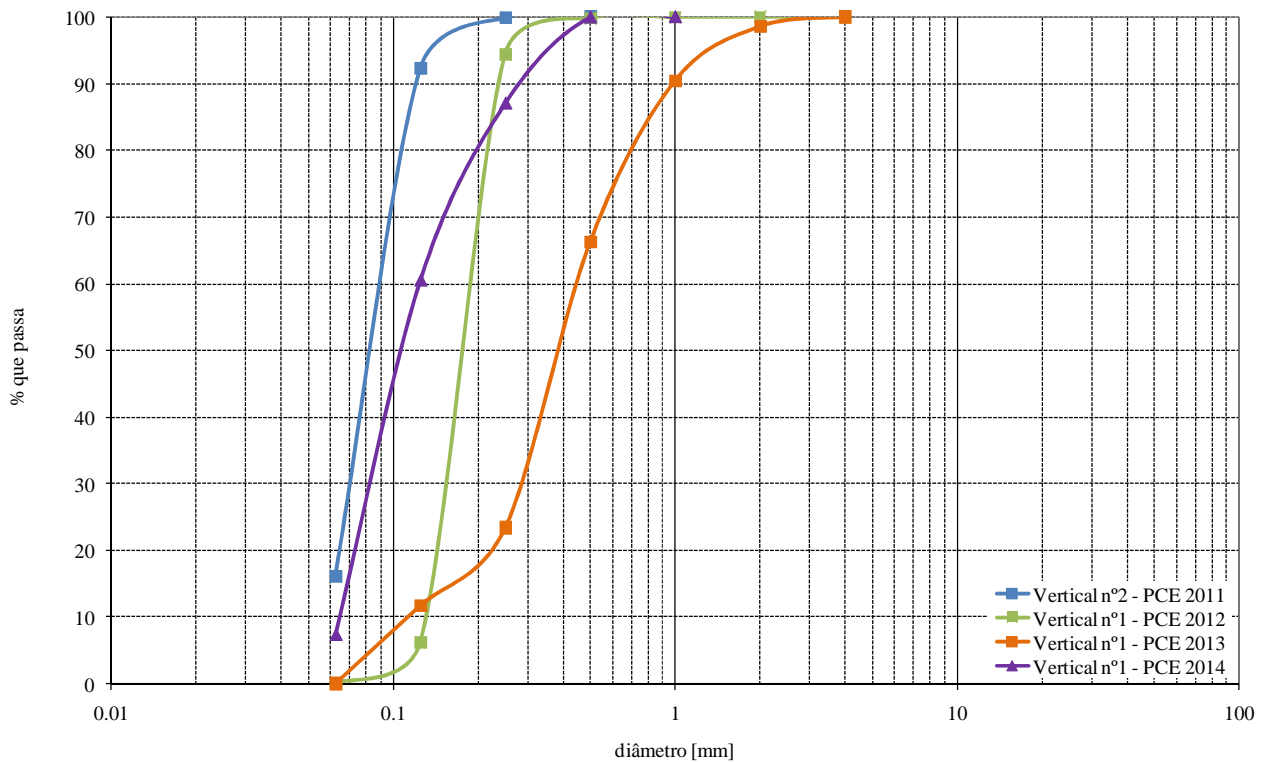
**Figura 4.11.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 31,1**



**Figura 4.12.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 51,6**

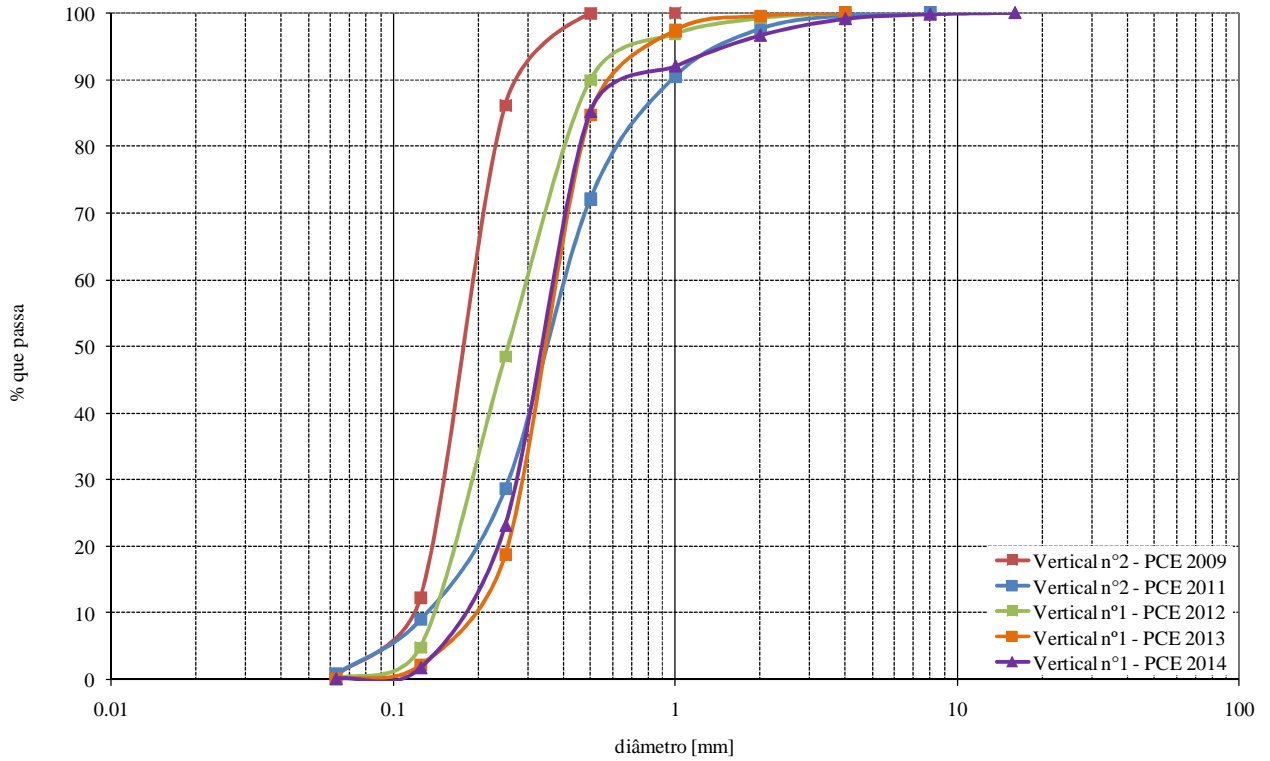


**Figura 4.13.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 68,2**

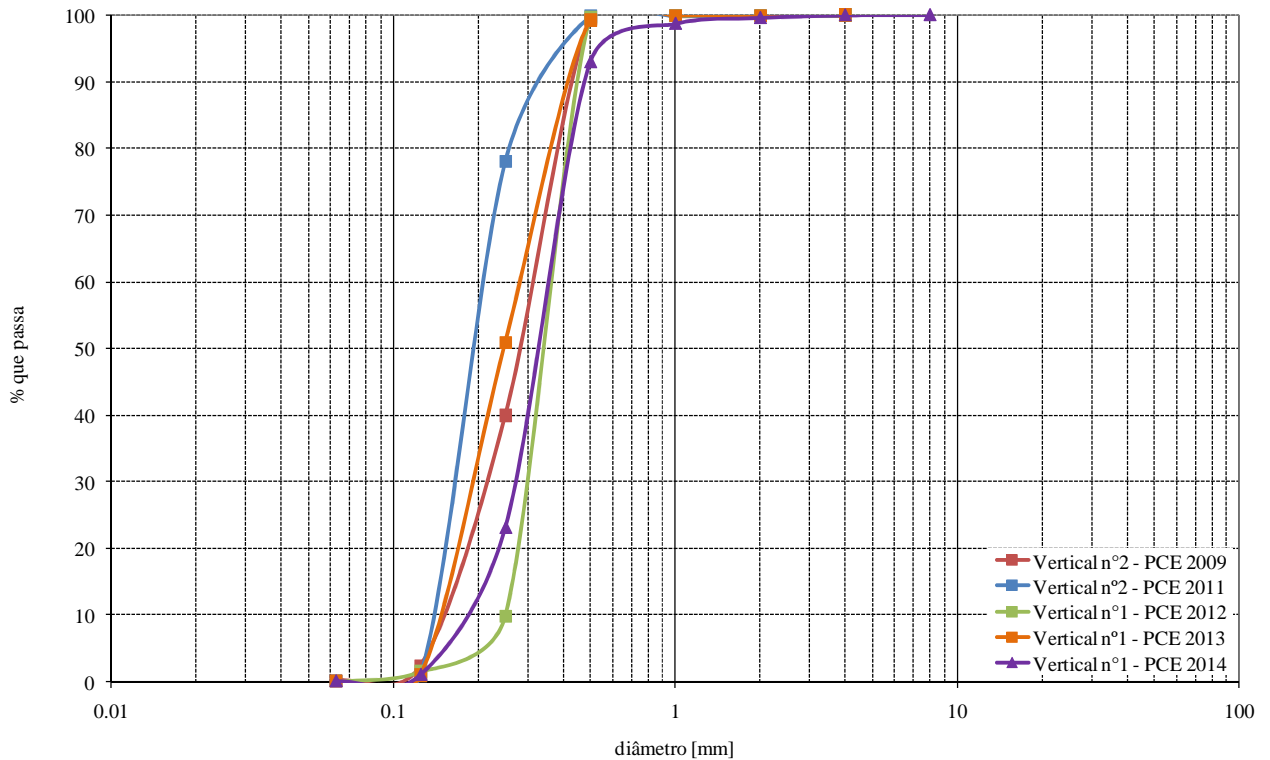




**Figura 4.14.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 76,3**

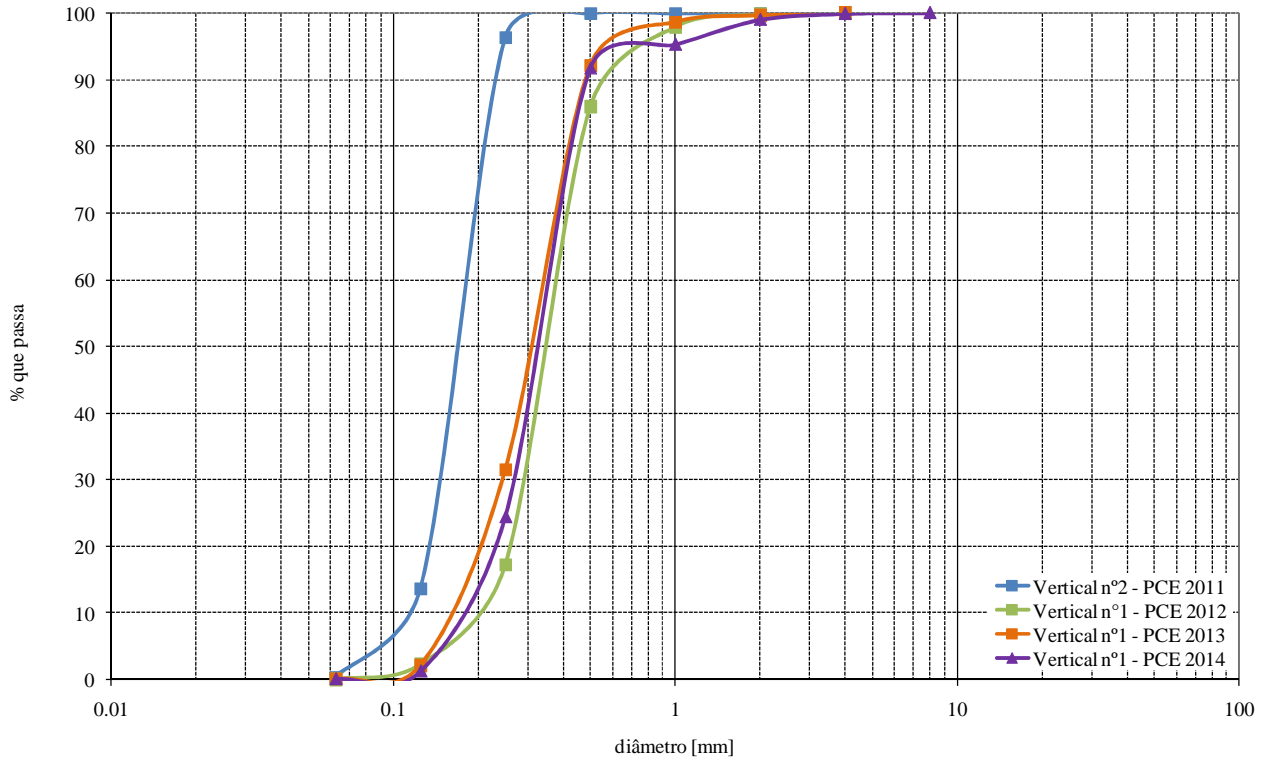


**Figura 4.15.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 101,3**

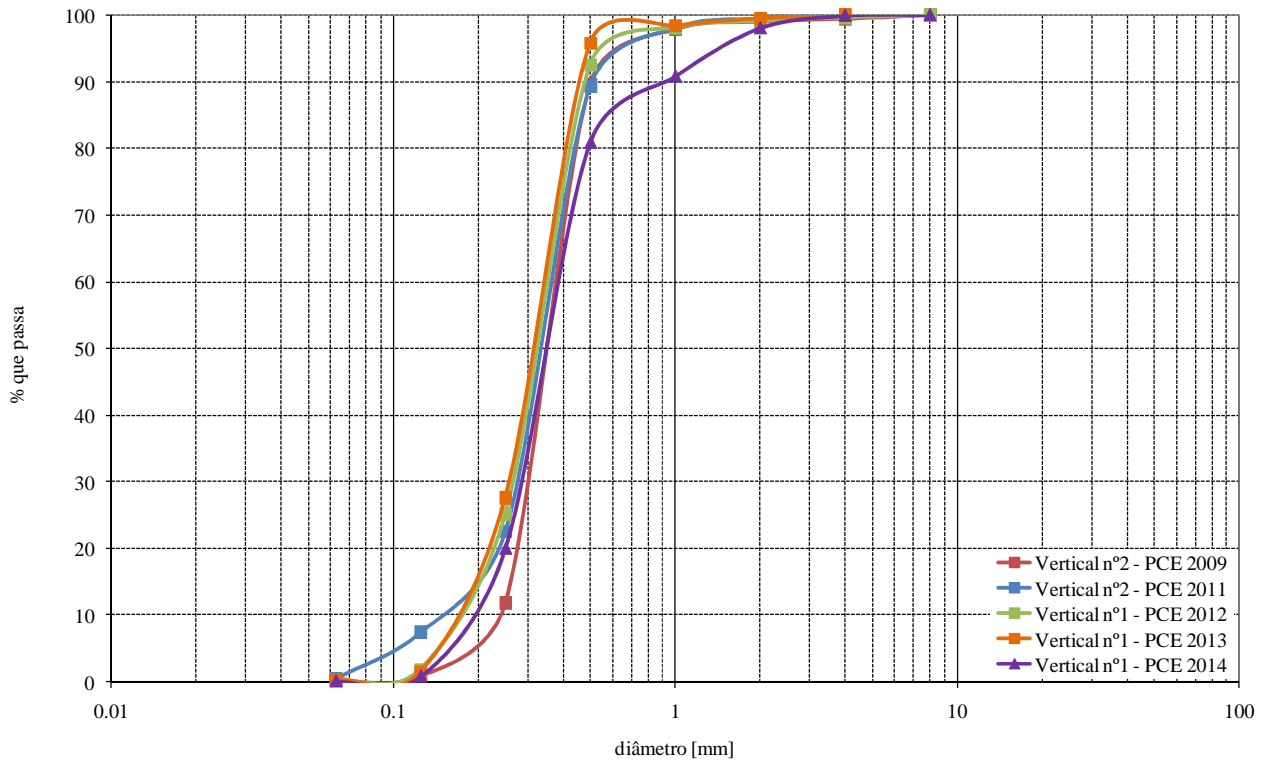




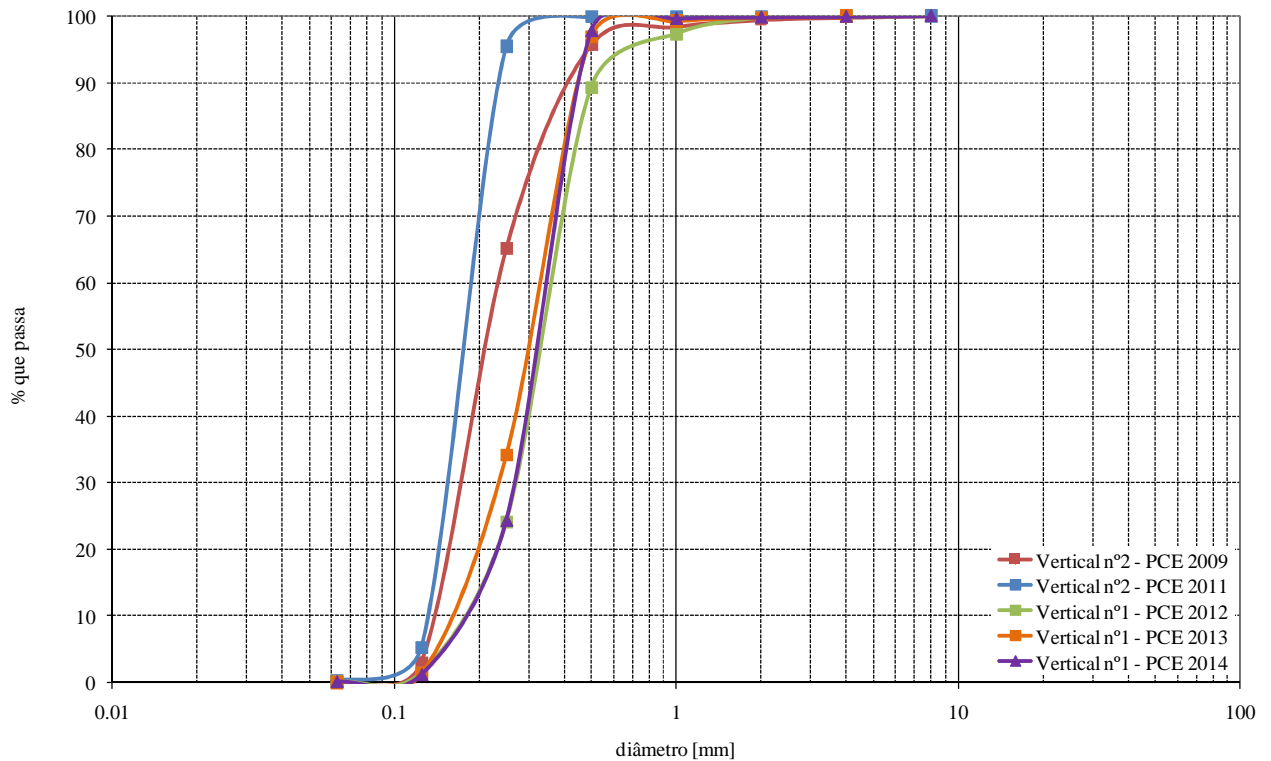
**Figura 4.16.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 113,8**



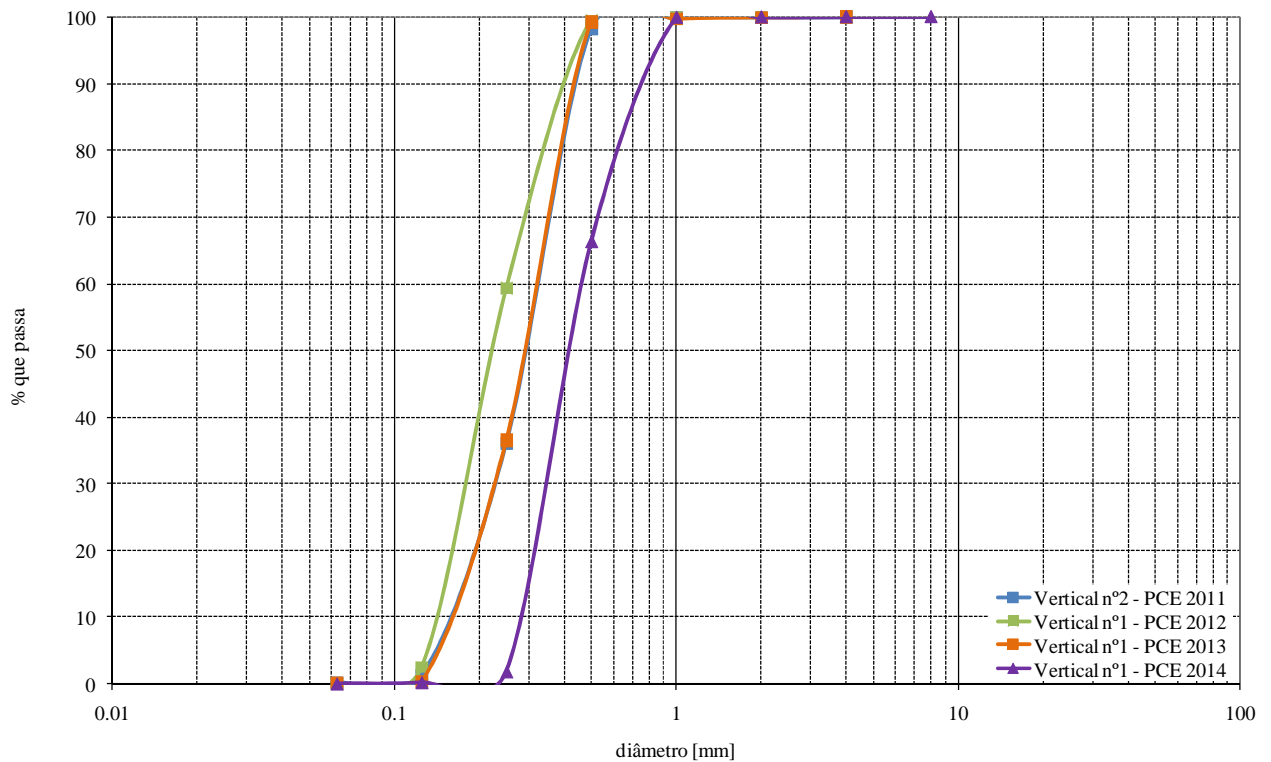
**Figura 4.17.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 129,8**



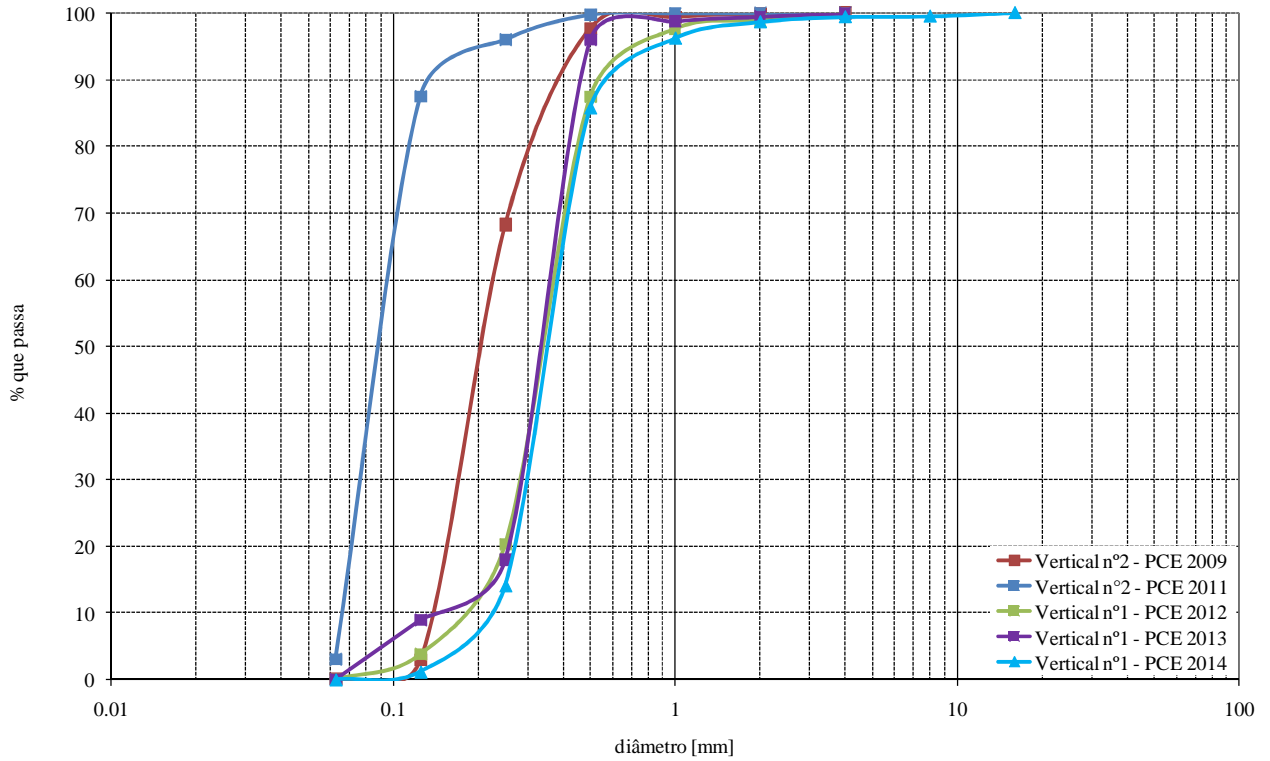
**Figura 4.18.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 146,3**



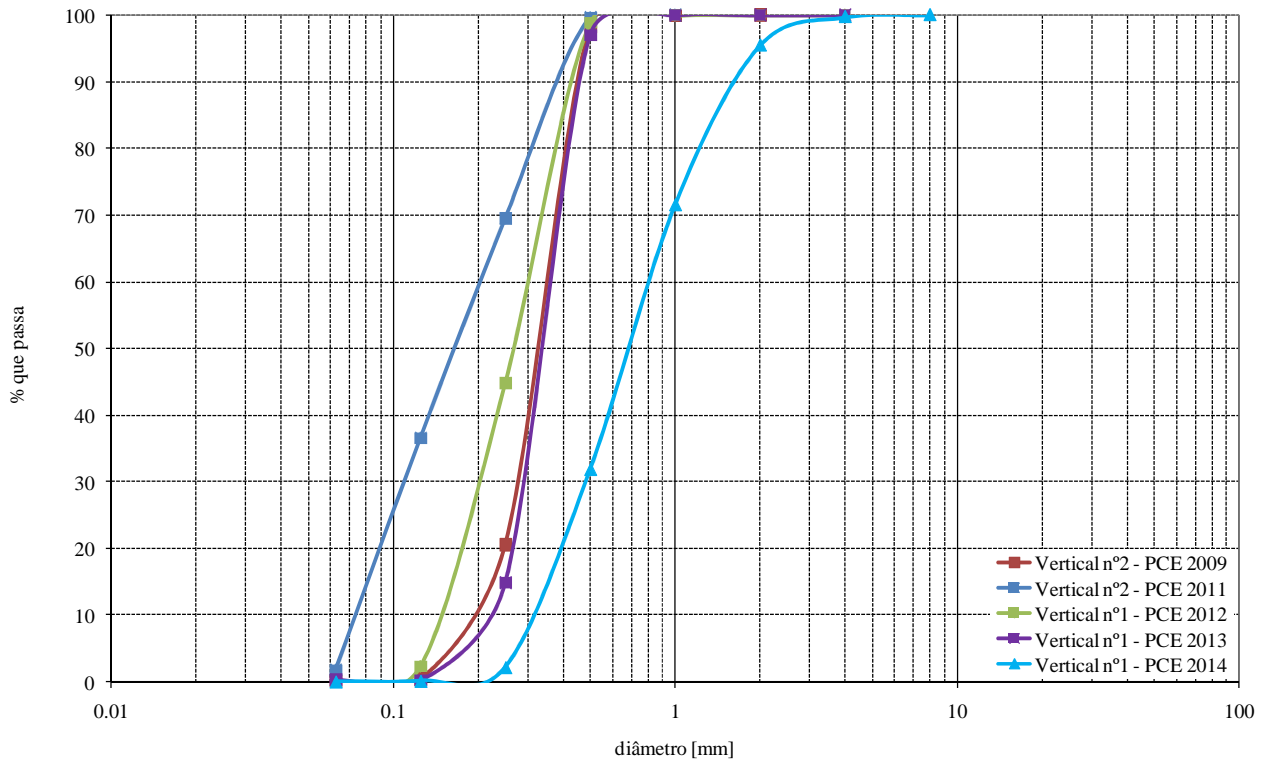
**Figura 4.19.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 157,1**



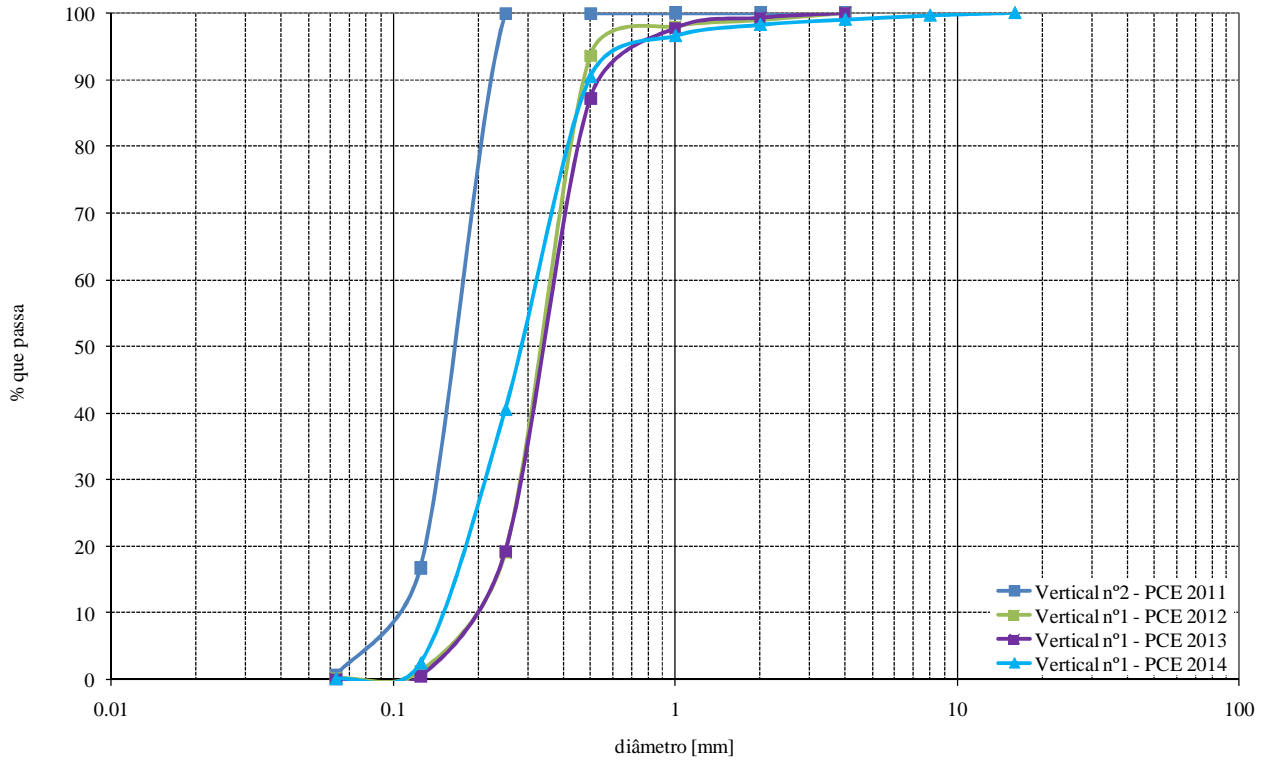
**Figura 4.20.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 165,8**



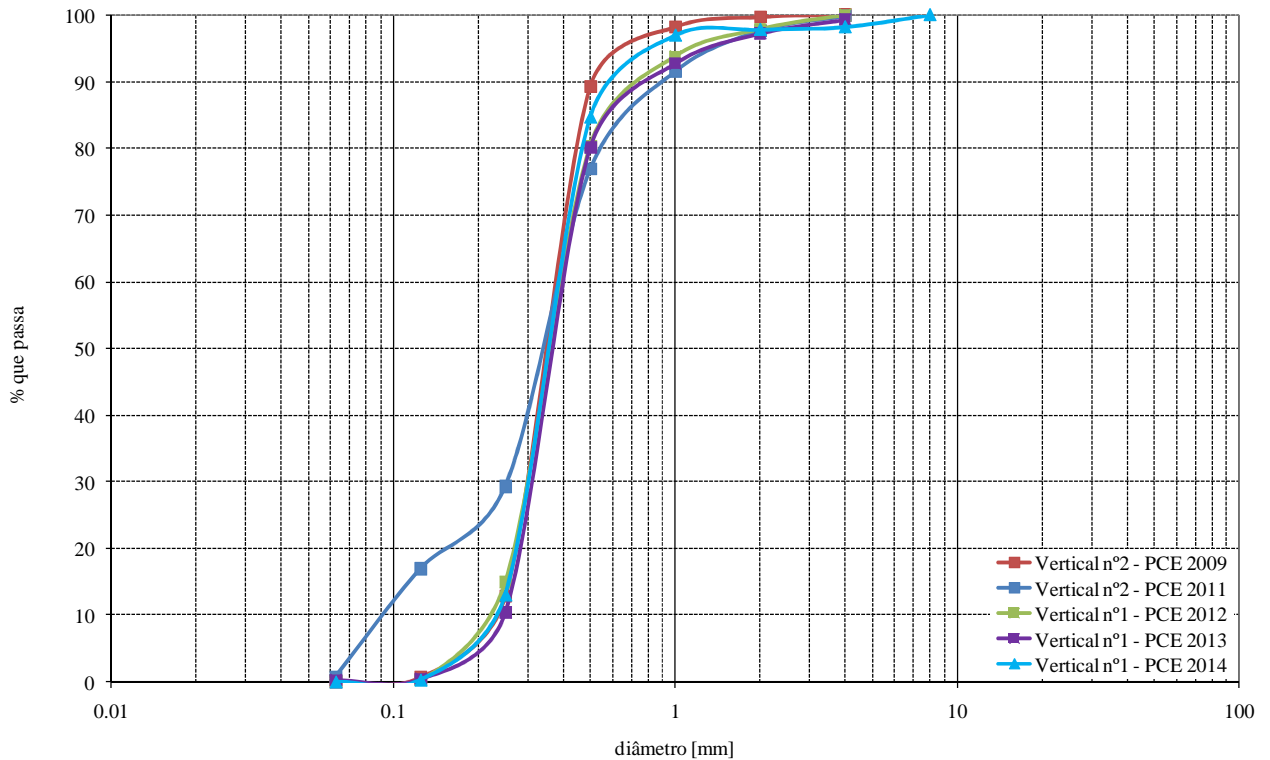
**Figura 4.21.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 190,6**



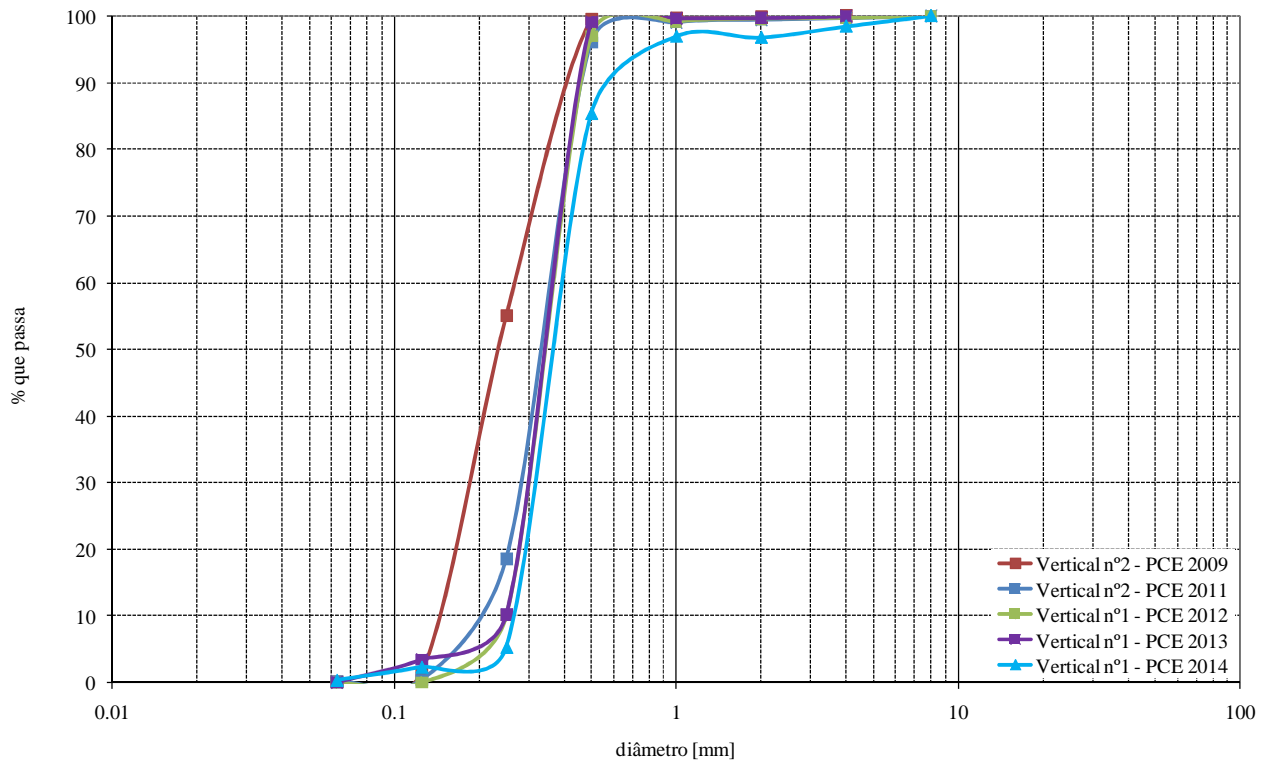
**Figura 4.22.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 201,6**



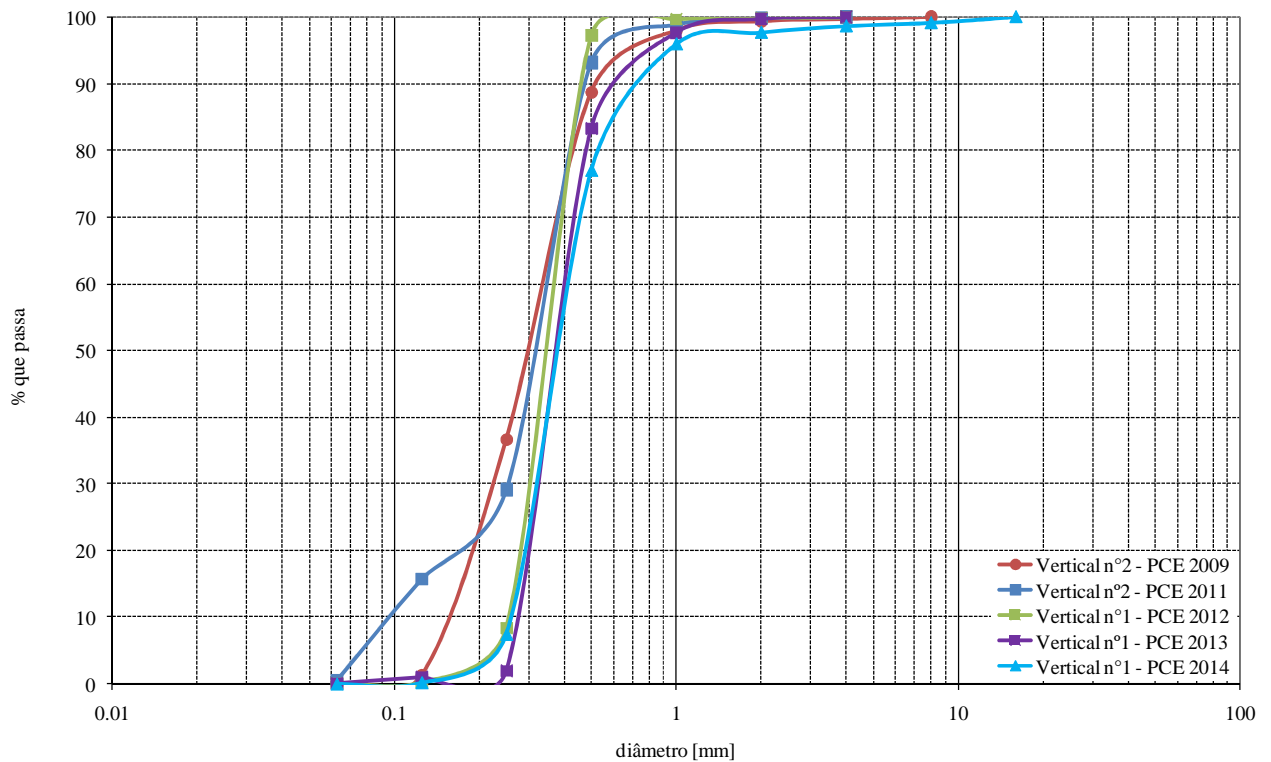
**Figura 4.23.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 219,2**



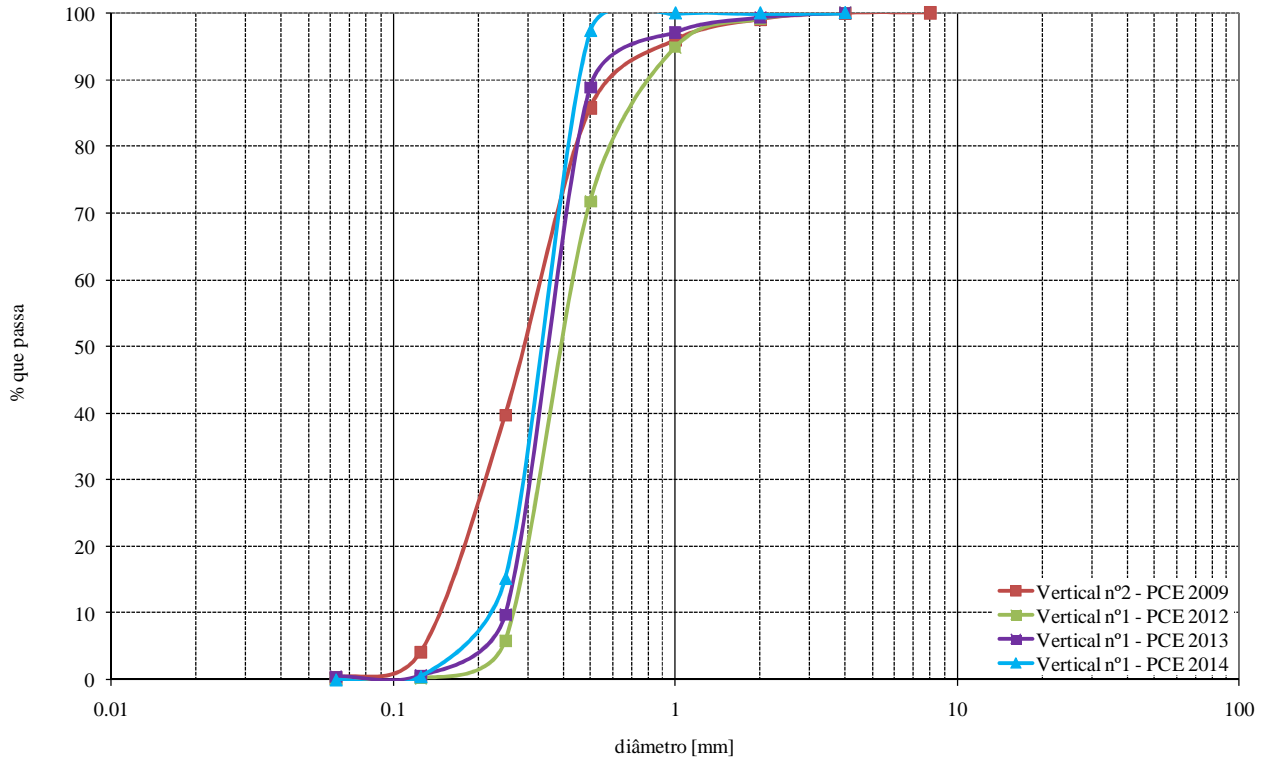
**Figura 4.24.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 230,2**



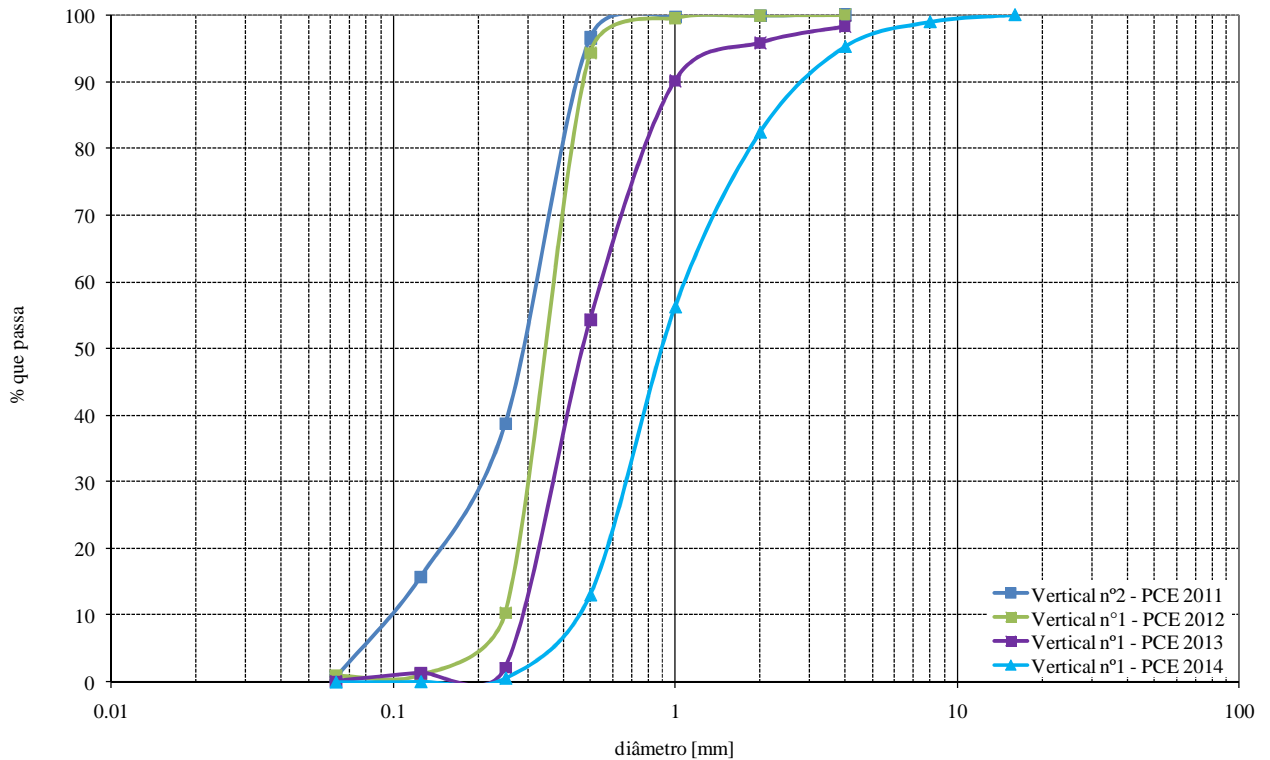
**Figura 4.25.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 242,6**



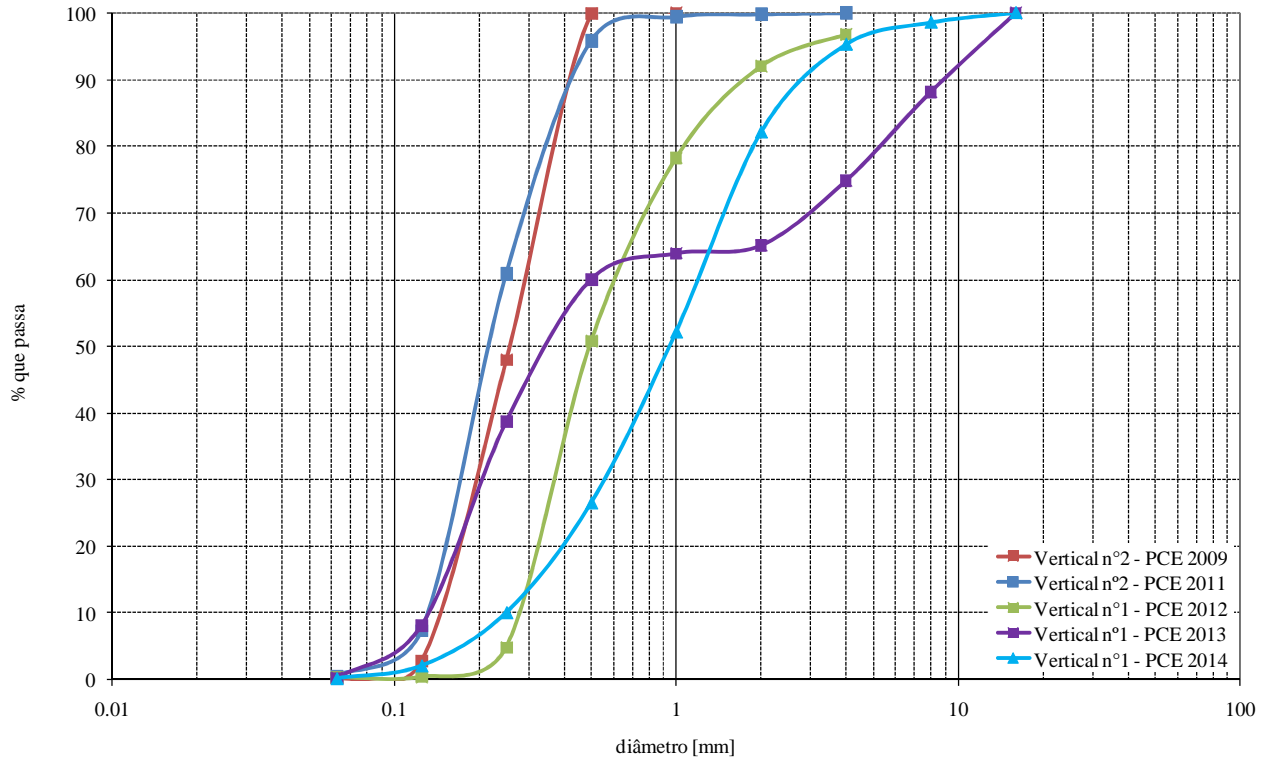
**Figura 4.26.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 251,9**



**Figura 4.27.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 255,1**



**Figura 4.28.**  
**Curva Granulométrica do Material do Leito na Seção ST 256,0**



## ANEXO I



**Desenho PJ0955-Z-H41-GR-DE-0001-R0A**

**“Localização das Seções Topobatimétricas para Acompanhamento da  
Evolução do Leito”**