

# UHE SANTO ANTÔNIO



**MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO  
SEDIMENTOLÓGICO DO RIO MADEIRA E DO FUTURO  
RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTONIO**

**ESTUDOS DE REMANSO  
DO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO**

**PJ0696-X-H41-GR-ED-006-1A**

**JUNHO/2010**

## UHE SANTO ANTÔNIO

# MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO SEDIMENTOLÓGICO DO RIO MADEIRA E DO FUTURO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTONIO

## ESTUDOS DE REMANSO DO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO

### RELATÓRIO DE MODELAGEM

**PJ0696-X-H41-GR-ED-006-1A**

**JUNHO/2010**

1	29/06/2010	REVISÃO	MAS	EFM	JCS
0	22/06/2010	EMISSÃO INICIAL	AAS/MAS	EFM	JCS
<b>REV.</b>	<b>DATA</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>ELAB.</b>	<b>VISTO</b>	<b>APROV.</b>

## ÍNDICE

<i>Item</i>	<i>Assunto</i>	<i>Página</i>
<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	02
<b>1.1.</b>	<b>OBJETIVO</b>	03
<b>1.2.</b>	<b>ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO</b>	03
<b>2.</b>	<b>METODOLOGIA E CRITÉRIOS GERAIS</b>	04
<b>2.1.</b>	<b>O MODELO HIDRÁULICO EMPREGADO</b>	05
<b>2.2.</b>	<b>CALIBRAGEM DO MODELO PARA CONDIÇÕES NATURAIS</b>	06
<b>2.3.</b>	<b>COEFICIENTES DE MANNING PARA O RESERVATÓRIO</b>	07
<b>3.</b>	<b>RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO</b>	09
<b>3.1.</b>	<b>BASE DE DADOS</b>	10
<b>3.1.1.</b>	<u>Estações Fluviométricas e Limnimétricas</u>	10
<b>3.1.2.</b>	<u>Perfis de Linha d'Água</u>	11
<b>3.1.3.</b>	<u>Seções Topobatimétricas</u>	12
<b>3.2.</b>	<b>CALIBRAÇÃO DO MODELO EM CONDIÇÕES NATURAIS</b>	15
<b>3.3.</b>	<b>VALIDAÇÃO DO MODELO EM CONDIÇÕES NATURAIS</b>	22
<b>3.4.</b>	<b>COEFICIENTES DE RUGOSIDADE PARA A SITUAÇÃO COM RESERVATÓRIO</b>	27
<b>3.5.</b>	<b>PERFIS DE LINHA D'ÁGUA COM O RESERVATÓRIO</b>	27
<b>3.6.</b>	<b>CURVAS CHAVE COM INFLUÊNCIA DE REMANSO NOS LOCAIS DE INTERESSE</b>	37
<b>4.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	40
<b>5.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	42
<b>6.</b>	<b>ANEXO I – SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS UTILIZADAS NO PROCESSO DE MODELAGEM</b>	44
<b>7.</b>	<b>ANEXO II – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS NO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO</b>	60

## 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Objetivo

Este relatório contém os estudos de modelagem matemática unidimensional para determinação do remanso do reservatório da usina hidrelétrica de Santo Antônio, atualmente em construção no rio Madeira.

Os estudos foram elaborados pela concessionária Santo Antônio Energia – SAE por meio da empresa PCE – Projetos e Consultorias de Engenharia Ltda., a partir do consenso com a concessionária Energia Sustentável do Brasil – ESBR, empreendedora da UHE Jirau, por meio da LEME Engenharia, sobre a base de dados e critérios utilizados nos estudos de ambos os reservatórios, que compreenderam:

- a divulgação e utilização das seções topobatimétricas e das informações hidrométricas levantadas pelas empresas, o que permitiu uma melhor descrição da topologia fluvial e da qualidade da calibragem;
- o estabelecimento de metodologia única e critérios gerais comuns, consensados entre as partes, agregando, inclusive, as principais recomendações das reuniões técnicas já realizadas com a ANEEL sobre o tema;
- a análise crítica dos resultados, principalmente quanto à influência do reservatório da UHE Santo Antônio sobre a UHE Jirau.

Destaca-se que a base de dados reunida, cerca de 57 seções transversais e 8 réguas limnimétricas no reservatório de Santo Antônio, com cerca de 120 km, e de 51 seções e 7 réguas no reservatório de Jirau, com cerca de 141 km, retrata o grande esforço das empresas para elaboração de um modelo de simulação confiável, com qualidade significativamente superior ao disponível nas etapas anteriores de projeto.

Os estudos aqui apresentados permitiram definir os perfis de linha d'água ao longo do reservatório da UHE Santo Antônio, para diferentes vazões e níveis d'água e as curvas chave no Canal de Fuga da UHE Jirau e a jusante da Cachoeira de Jirau, com influência do reservatório de Santo Antônio.

## 1.2. Organização do Relatório

O relatório está organizado em cinco capítulos incluindo esta Introdução. O capítulo 2 apresenta a metodologia, os critérios gerais utilizados na calibragem do modelo para condições naturais e os critérios gerais para definição dos coeficientes de rugosidade para a condição dos reservatórios implantados.

No capítulo 3 são detalhados os estudos de remanso para o reservatório da UHE Santo Antônio, destacando a base de dados utilizada, a calibração do modelo em condições naturais, a validação do modelo, os coeficientes de rugosidade para a situação com reservatório, os perfis de linha d'água com o reservatório para diferentes vazões e níveis d'água dos reservatórios e as curvas chave com influência de remanso nos locais de interesse.

As principais conclusões do estudo são apresentadas no capítulo 4. Finalmente, o capítulo 5 reúne as referências bibliográficas citadas ao longo do texto.

## **2. METODOLOGIA E CRITÉRIOS GERAIS**

## 2.1. O Modelo Hidráulico Empregado

Os estudos foram realizados com base em modelagem hidráulica do rio Madeira com o emprego do modelo HEC-RAS – River Analysis System, desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers, tendo sido empregada a versão 4.0, de 2008. Este modelo permite representar o escoamento unidimensional em rios e canais em condições de regime permanente e não permanente, oferecendo uma interface de utilização simples e conferindo bastante agilidade nas análises.

Para efeito dos estudos de remanso, o modelo HEC-RAS permite o cálculo dos perfis de linha d'água e de linha de energia através da solução das equações unidimensionais associadas ao regime permanente gradualmente variado, em regime subcrítico ou supercrítico, para diversas condições hidrológicas.

Para o caso do regime permanente gradualmente variado, o modelo emprega o “Standard Step Method”, que se trata de um procedimento iterativo para solução da equação de Energia de escoamentos a superfície livre. Esta equação pode ser representada da seguinte maneira:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_c$$

onde:

$Y_1, Y_2 \rightarrow$  tirante hidráulico nas seções transversais;

$Z_1, Z_2 \rightarrow$  cota do fundo do canal principal;

$v_1, v_2 \rightarrow$  velocidades médias de escoamento;

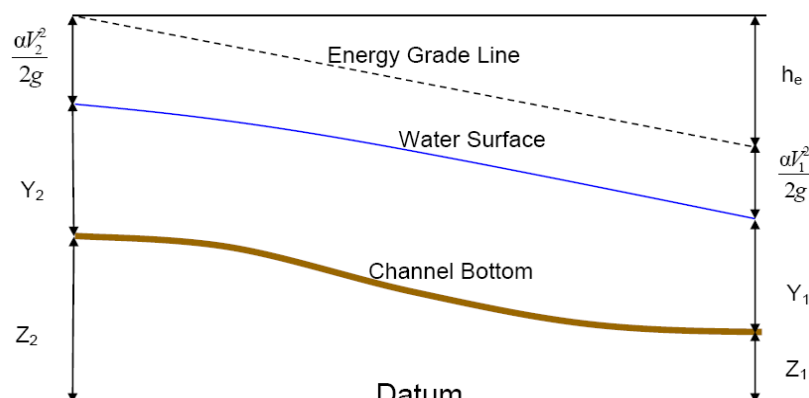
$\alpha_1, \alpha_2 \rightarrow$  coeficientes de Coriollis;

$g \rightarrow$  aceleração da gravidade;

$h_c \rightarrow$  perda de carga.

A figura a seguir ilustra os termos desta equação.

**Figura 2.1.**  
**Representação dos Termos da Equação de Energia**



A perda de carga entre duas seções transversais consecutivas é composta por perdas por atrito e perdas por contração/expansão do escoamento. A equação para perda de carga é apresentada a seguir:

$$h_e = L\bar{S}_f + c \left[ \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right],$$

onde:

L → distância entre seções;

$\bar{S}_f$  → perda de carga por atrito, por metro, entre duas seções;

c → coeficiente de perda de carga por expansão ou contração;

As perdas por atrito são estimadas pela formulação de Manning:

$$Sf_i = \frac{n^2 \cdot v^2}{R^{4/3}},$$

onde:

Sf<sub>i</sub> → perda hidráulica na seção “i”;

n → coeficiente de Manning;

v → velocidade de escoamento;

R → raio hidráulico.

## 2.2. Calibragem do Modelo para Condições Naturais

A aferição do modelo HEC-RAS para as condições naturais de escoamento do rio Madeira consistiu na atuação sobre os coeficientes de perdas de carga e os coeficientes de rugosidade representados pelo número de Manning. Em razão das características do rio Madeira no trecho do reservatório em estudo, onde se configuram diversos controles de calha (controles hidráulicos localizados) sobre os níveis d'água naturais, atuou-se também com adaptações sobre a geometria de algumas seções transversais. Esse procedimento objetivou uma real caracterização do controle hidráulico nas cachoeiras, onde não foi possível obter seções transversais por levantamento de campo, por conta das dificuldades técnicas e perigos de navegação.

O processo de aferição teve como meta reproduzir, a partir das simulações com o modelo, os perfis de níveis d'água instantâneos naturais medidos no conjunto de 8 réguas limnimétricas localizadas entre a UHE Santo Antônio e a UHE Jirau.

O trecho do reservatório estudado foi dividido em trechos menores entre seções com réguas limnimétricas. Para cada um desses trechos menores adotou-se um valor de



Manning que resultasse em um bom ajuste entre o nível de água calculado e o nível medido na régua limnimétrica de montante do trecho.

O ajuste de Manning foi realizado trecho a trecho para cada vazão simulada no HEC-RAS. Portanto, no modelo calibrado, os valores de Manning variam ao longo do rio e variam também com a vazão simulada.

Os demais coeficientes e opções de métodos do HEC-RAS foram mantidos em suas configurações default.

### **2.3. Coeficientes de Manning para o Reservatório**

Os estudos de remanso anteriores a este relatório consideraram uma minoração do coeficiente de Manning nas simulações de reservatório, em relação aos coeficientes da calibragem das condições naturais do rio. Esta minoração deveu-se basicamente aos seguintes fatores:

- a. Desmatamento da área a ser alagada;
- b. Tendência natural de redução do coeficiente de Manning com o aumento das vazões e níveis de água (diminuição da rugosidade relativa, da sinuosidade);
- c. Redução da turbulência na condição de reservatório e conseqüente redução das perdas de energia por transporte turbulento de quantidade de movimento, que na modelagem unidimensional recaem sobre o coeficiente de Manning.

Estudos recentes, com a própria calha do rio Madeira (STRASSER, 2005), indicaram que, mesmo em condições naturais, somente a elevação do tirante d'água acarretava redução do coeficiente de Manning a valores de até 0,015.

Outras referências como o Manual do Modelo HEC-RAS (USACE 2008) e as tradicionais recomendações do livro Hidráulica de Canais Abertos (CHOW, 1959), justificam a adoção de valores mais baixos para o coeficiente de Manning para a situação de reservatório desmatado.

Observa-se que, entre os casos apresentados em CHOW (1959), não se encontra uma situação que descreva de forma exata e completa as condições dos reservatórios desmatados, mas a situação de "terra desmatada" do reservatório poderia ser caracterizada por solo exposto, sem vegetação, sem raízes, relativamente aplainado. Com essa descrição, nas observações de Ven Te Chow, há indicação de coeficientes na faixa de 0,025 para canais naturais em "terra desmatada".

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

Entretanto, na reunião de 19 de maio de 2010 em Brasília, foi colocado pela ANEEL aos técnicos da ESBR e SAE, que a redução do Manning como explicada acima, apesar de teórica e experimentalmente bem embasada, carrega ainda algum grau de subjetividade, dificultando a sua aceitação.

Na mesma reunião, como forma de eliminar essa subjetividade, foi sugerido pela ANEEL que se calibrasse o Manning para cada vazão simulada no HEC-RAS, com o intuito de se encontrar a tendência natural de variação do Manning citada no item “b” acima. A partir da tendência assim obtida, os coeficientes de Manning seriam extrapolados para as condições de reservatório. Essa metodologia, apesar de não englobar os efeitos citados em “a” e “c” na itemização acima, foi a metodologia adotada nos trabalhos apresentados neste relatório.

### **3. REMANSO DEVIDO AO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO**

### 3.1. Base de Dados

#### 3.1.1. Estações Fluviométricas e Limnimétricas

A partir das séries de vazões observadas na estação de Porto Velho, foram estabelecidas as vazões no modelo hidráulico, ao longo do estirão modelado, tanto para a calibração em condições naturais quanto para a simulação com o reservatório de Santo Antonio. A distribuição se baseou na relação entre a área de drenagem da estação de Porto Velho e a área da bacia no local considerado.

Nessa estação têm sido realizadas medições de descarga líquida, além do registro sistemático dos níveis d'água. As medições de descarga líquida foram iniciadas na mesma época da instalação da estação.

As relações utilizadas foram:

- Trecho da UHE Jirau até Foz do rio Jaciparaná =  $0,985 * Q_{\text{Porto Velho}}$ ;
- Trecho da Foz do rio Jaciparaná até a Estação de Porto Velho = Vazão na Estação de Porto Velho ( $Q_{\text{Porto Velho}}$ )

Ao longo do reservatório 8 estações limnimétricas, instaladas nas diversas fases do projeto, foram utilizadas para controle dos níveis d'água, conforme mostra o quadro a seguir:

**Quadro 3.1.  
Estações Limnimétricas**

Estação	Cota do zero da régua (m)
Régua 4 Sto Antônio	40,52
Teotônio Jusante	42,35
Teotônio Montante	52,07
Morrinho Jusante	53,20
Morrinho Montante	54,00
Foz do Jaciparaná	54,91
Jusante Caldeirão do Inferno / Lucas *	54,23
Régua 4 Jirau (Porto) **	58,79
Régua Jusante Cachoeira de Jirau	47,38

\* Operada pela SAE e ESBR

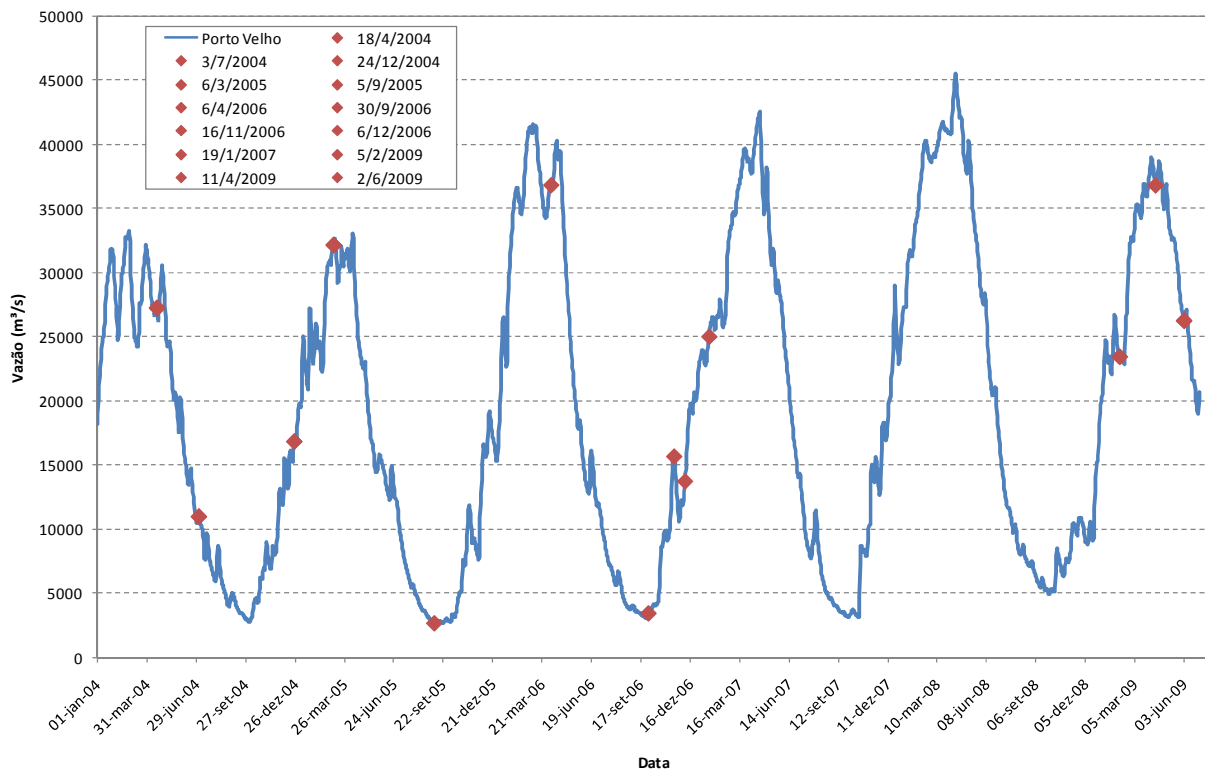
\*\* Operada pela ESBR

### 3.1.2. Perfis de Linha d'Água

Para subsidiar a calibração do modelo hidráulico, foram selecionadas algumas datas, entre janeiro de 2003 e julho de 2009, com informações suficientes para definição de perfis de linha d'água entre a UHE Santo Antônio e a régua a jusante da cachoeira de Jirau passando pelo eixo da UHE Jirau.

As datas selecionadas abrangem as quatro condições hidrológicas (enchente, cheia, vazante e estiagem), tendo sido escolhidas aquelas que apresentavam o maior número possível de locais com nível d'água registrado e, também, vários dias seguidos com níveis constantes ou com pequenas variações. A Figura a seguir mostra o fluviograma do rio Madeira em Porto Velho e destaca as datas dos perfis selecionados.

**Figura 3.1.**  
**Fluviograma do Rio Madeira em Porto Velho (Janeiro de 2004 a Julho de 2009)**



O Quadro a seguir lista as datas selecionadas para elaboração dos perfis de linhas d'água, suas respectivas condições hidrológicas e as vazões registradas na estação de Porto Velho nessas datas.

**Quadro 3.2.**  
**Datas Seleccionadas para os Perfis de Linha d'Água**

<b>Data do Registro</b>	<b>Vazão em Porto Velho (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Condição Hidrológica</b>
18/04/04	27.286	cheia
03/07/04	11.001	vazante
24/12/04	16.871	enchente
06/03/05	32.162	cheia
05/09/05	2.682	estiagem
06/04/06	36.839	cheia
30/09/06	3.455	estiagem
16/11/06	15.686	enchente
06/12/06	13.751	enchente
19/01/07	25.024	enchente
05/02/09	23.457	enchente
11/04/09	36.817	cheia
02/06/09	26.299	vazante

A análise dos dados permite as seguintes constatações:

- Existe uma grande concentração de níveis d'água levantados no trecho situado nas proximidades da barragem de Santo Antonio, em virtude das réguas existentes, cuja localização foi definida em função de necessidades da obra e também para subsidiar a calibração do modelo hidráulico reduzido, atualmente em fase de operação;
- O trecho a montante de Santo Antônio se caracteriza pela forte presença de corredeiras e cachoeiras, o que foi verificado também nas diversas viagens de inspeção;
- De maneira geral, as datas seleccionadas apresentam perfis consistentes e semelhantes entre si.

### 3.1.3. Seções Topobatimétricas

As seções topobatimétricas do rio Madeira no estirão em estudo, entre a estação de Porto Velho e o eixo do barramento da UHE Jirau, foram levantadas em diversas fases do projeto. Os primeiros levantamentos abrangeram o estirão do futuro reservatório de Santo Antônio e ocorreram durante os Estudos de Viabilidade.

Recentemente, em campanhas realizadas em 2009, como parte do Programa de Levantamentos e de Monitoramento Hidrossedimentológico do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio, foram obtidas mais 44 seções topobatimétricas do rio Madeira, quase todas situadas no trecho do futuro reservatório.

Ao todo, foram utilizadas no modelo hidráulico 48 seções topobatimétricas e 13 batimétricas levantadas em campo, no trecho a montante do eixo da barragem de Santo Antônio.

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

Foram agregadas também 16 seções topobatimétricas levantadas pela ESBR no âmbito dos estudos da UHE Jirau, localizadas entre a Cachoeira de Jirau e um trecho de aproximadamente 15km localizado a jusante da Cachoeira do Caldeirão do Inferno.

O Quadro a seguir apresenta a lista das seções topobatimétricas levantadas em campo, cuja localização está indicada no desenho PJ0696-Z-H41-GR-DE-103-1A (Anexo II). As seções são identificadas pela sua distância, medidas em km, até a seção de Humaitá, no extremo de jusante do trecho objeto do Programa de Monitoramento já mencionado. Os desenhos de todas as seções utilizadas durante a modelagem são apresentados no Anexo I – Seções Topobatimétricas Utilizadas no Processo de Modelagem.

**Quadro 3.3.  
Seções Topobatimétricas**

<b>SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS UTILIZADAS NOS ESTUDOS</b>		
<b>Seção</b>	<b>Fase dos Levantamentos</b>	<b>Local</b>
259,5	Viabilidade	Eixo da barragem da UHE Santo Antônio
259,8	Viabilidade	
260,0	PCE 2010	Cachoeira Santo Antônio
260,2	PCE 2009	
260,5	Viabilidade	
261,0	PCE 2009	
261,5	PCE 2009	
262,1	PCE 2009	Régua R-1 Montante Cachoeira Santo Antônio
262,7	PCE 2009	
263,1	PCE 2009	Régua R-11 Montante Cachoeira Santo Antônio
263,4	Viabilidade	
264,0	PCE 2009	
264,5	PCE 2009	
264,7	PCE 2009	Régua R-4 Montante Cachoeira Santo Antônio
264,9	PCE 2009	
265,9	PCE 2009	
267,0	PCE 2009	
271,0	PCE 2009	
273,5	PCE 2009	Ilha de Teotônio
276,1	PCE 2009	Estação Cachoeira Teotônio Jusante
276,8	PCE 2010	Cachoeira Teotônio
277,0	PCE 2010	Cachoeira Teotônio
277,4	PCE 2009	Estação Cachoeira Teotônio Montante
279,0	PCE 2009	
280,4	PCE 2009	
282,5	PCE 2009	
288,8	PCE 2009	
292,5	PCE 2009	Estação Pedral Jusante PCE
294,7	PCE 2009	Estação Pedral Jusante FURNAS
296,2	PCE 2009	
299,4	PCE 2009	
301,8	PCE 2009	
303,0	PCE 2009	Estação Cachoeira do Morrinho Jusante
307,6	PCE 2009	
308,0	PCE 2010	Cachoeira Morrinhos

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

<b>SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS UTILIZADAS NOS ESTUDOS</b>		
<b>Seção</b>	<b>Fase dos Levantamentos</b>	<b>Local</b>
309,4	PCE 2009	
310,7	PCE 2009	Estação Cachoeira do Morrinho Montante
312,9	PCE 2009	
318,8	PCE 2009	
324,7	PCE 2009	
327,5	PCE 2009	Ilha Liverpool
330,8	PCE 2009	
334,3	PCE 2009	
338,2	Viabilidade	Estação Foz do Rio Jaciparaná
340,2	PCE 2009	
343,5	PCE 2009	
347,1	Viabilidade	
350,0	PCE 2009	
352,4	Viabilidade	
356,4	PCE 2009	
361,5	PCE 2009	
364,6	Viabilidade	
366,5	ESBR 2010	RN – 01
367,3	PCE 2009	
367,5	ESBR 2010	RN – 03
368,5	ESBR 2010	RN – 04
370,5	ESBR 2010	RN – 05
370,9	PCE 2009	Estação Jusante Caldeirão do Inferno - Lucas
371,5	ESBR 2010	RN – 06
372,5	ESBR 2010	RN – 07
373,5	ESBR 2010	RN – 08
374,5	ESBR 2010	RN – 09
375,2	ESBR 2010	RN – 10
375,5	Viabilidade	
375,9	ESBR 2010	Estação Canal de Fuga da UHE Jirau (Porto) / RN – 11
376,5	Viabilidade	
380,1	ESBR 2010	RN - 16
380,8	PCE 2010	Cachoeira Caldeirão do Inferno
381,7	Viabilidade	
382,0	Viabilidade	
382,2	ESBR 2010	RN – 20
383,9	ESBR 2010	SJ1
384,3	ESBR 2010	RN – 21
386,7	ESBR 2010	RN – 23
387,8	ESBR 2010	RN – 24
388,2	Viabilidade	
389,0	Viabilidade	Jusante Cachoeira de Jirau

As simulações de remanso do reservatório abarcam o trecho compreendido entre as seções 259,5 (Cachoeira de Santo Antônio) e 389 (Canal de Fuga da UHE Jirau eixo da viabilidade). O eixo da barragem da UHE Jirau situa-se no km 386,5, onde não foi levantada seção topobatimétrica.

Para a implementação do modelo hidráulico foram ainda consideradas, principalmente a montante de Porto Velho, as singularidades observadas durante visitas de inspeção, tais



como cachoeiras, corredeiras, estrangulamentos, pedrais, etc. O critério de definição dos locais de levantamento das seções topobatimétricas já considerava estas singularidades, prevendo seções a montante e jusante de cada uma. Entretanto, nem sempre o posicionamento definido no escritório pode ser materializado no campo, devido às características específicas de cada local. Nesses casos, durante a modelagem foram criadas seções auxiliares que permitiram ajustar os perfis de linha d'água nesses locais e simular de forma mais representativa o efeito das singularidades.

### **3.2. Calibração do Modelo em Condições Naturais**

A calibração do modelo consistiu em procurar ajustar os coeficientes de Manning dos diversos trechos do estirão fluvial, de modo a que os níveis d'água observados nas diversas datas apresentadas no item 3.1.2 pudessem ser reproduzidos nas simulações.

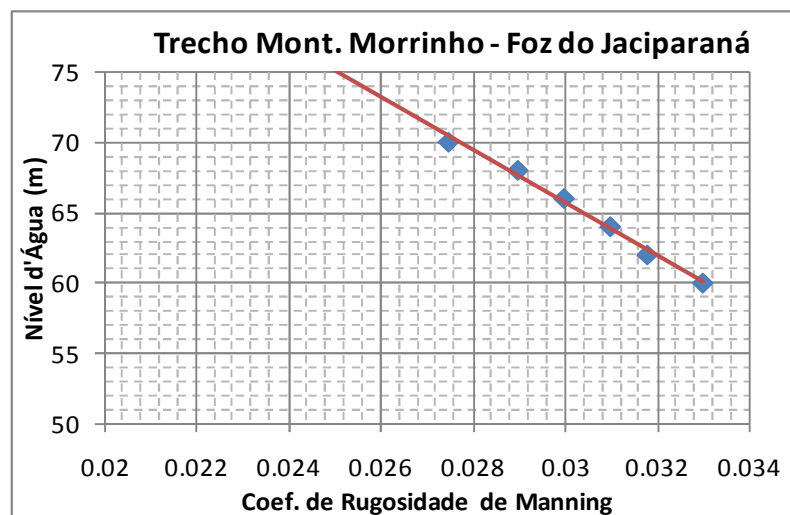
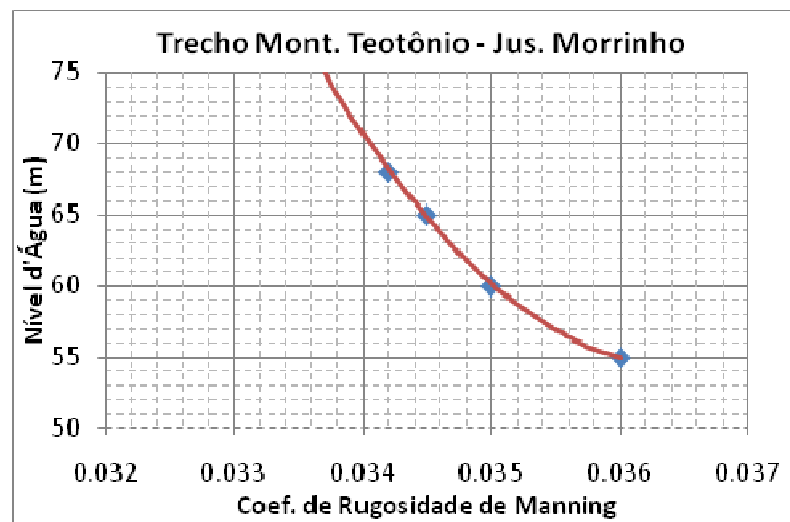
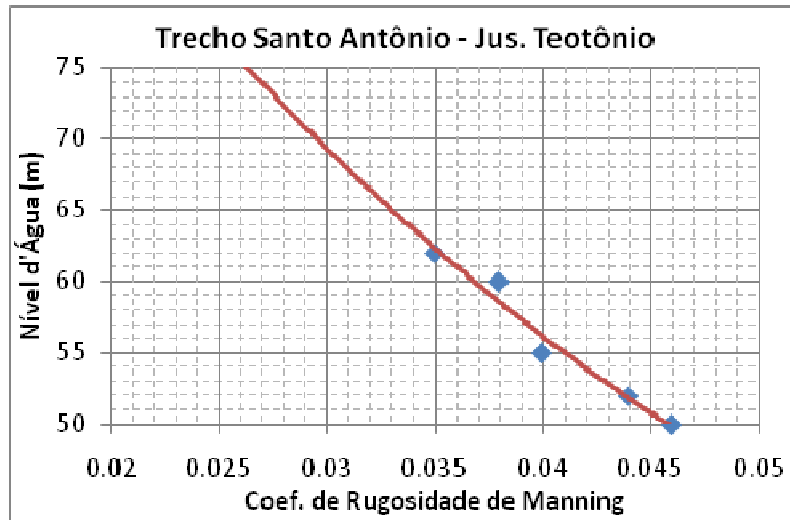
O processo dinâmico de calibração envolveu sucessivas tentativas de reproduzir os níveis d'água observados, variando-se, principalmente, os coeficientes de Manning, mas como último recurso, introduzindo ajustes nas seções de controle ou criando seções auxiliares nos trechos de singularidades mais marcantes.

O trecho a montante da cachoeira de Santo Antônio, corresponde ao trecho das “corredeiras do rio Madeira”, caracterizado por uma sucessão de controles estruturais (quedas, estrangulamentos, pedrais) entremeados por trechos relativamente calmos. Por isso, identificaram-se trechos menores, homogêneos, separados pelos principais acidentes existentes no leito.

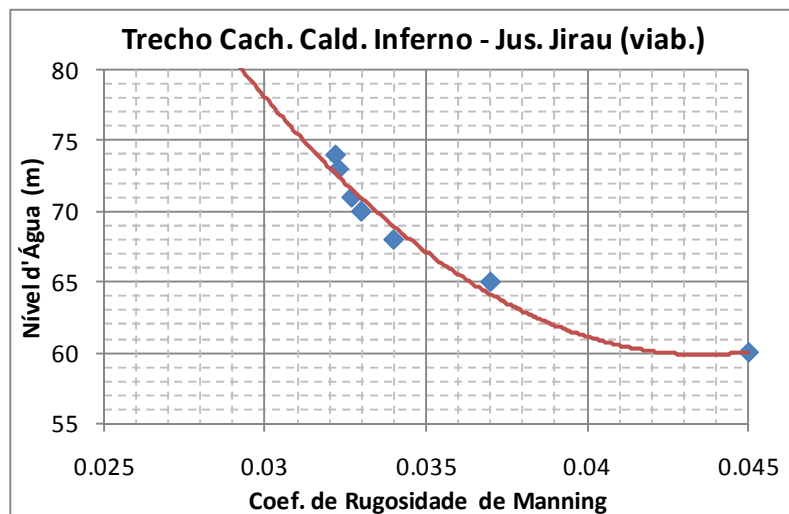
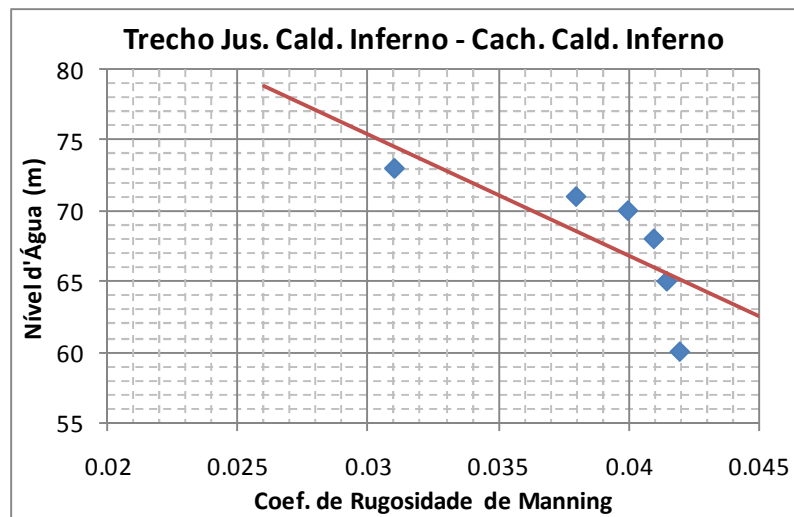
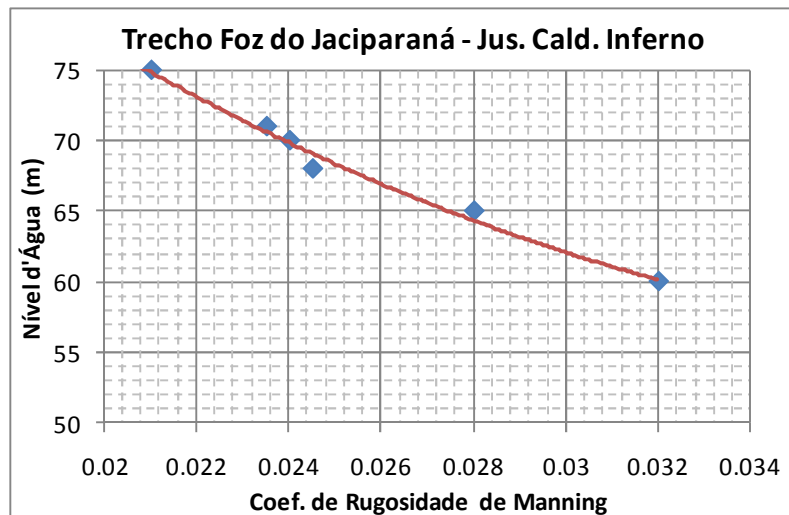
Aos coeficientes de Manning calibrados, variáveis com a profundidade, foram ajustados curvas de tendências que permitiram extrapolações para níveis mais altos, para serem aplicados nas simulações com o reservatório.

As figuras a seguir mostram a variação com a profundidade do canal natural do coeficiente de Manning nos diversos trechos e as extrapolações consideradas na fase seguinte de simulação com o reservatório.

**Figuras 3.2.**  
**Variação do Coeficiente de Manning Com a Profundidade do Escoamento**



**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**



O Quadro a seguir, mostra a topologia final do modelo na fase de calibragem, indicando os trechos considerados e os coeficientes de Manning ajustados.

**Quadro 3.4.  
Resultados da Calibração – Coeficientes de Rugosidade de Manning para a  
Situação em Condições naturais**

<b>Trecho do Rio</b>	<b>Coeficiente de Manning</b>
Santo Antônio – Jusante Teotônio	0,035–0,048
Montante Teotônio – Jusante Morrinho	0,034–0,036
Montante Morrinho – Foz do Jaciparaná	0,027–0,036
Foz do Jaciparaná – Jusante Caldeirão do Inferno	0,021–0,032
Jusante Caldeirão do Inferno – Cachoeira Caldeirão do Inferno	0,031–0,042
Cachoeira Caldeirão do Inferno – Jusante Cachoeira de Jirau	0,0322 - 0,045

Ao final da calibração, conseguiu-se ajustar o modelo para reproduzir satisfatoriamente todos os perfis de linha d'água observados.

A partir dos resultados obtidos na calibração do modelo, ou seja, níveis d'água observados comparados com os simulados para diversas situações hidrológicas, foram traçados alguns perfis de linha d'água que permitem caracterizar a qualidade da calibração realizada. Estes perfis são apresentados nas figuras a seguir, cada uma apresentando dois perfis de linha d'água simulados, confrontados com os níveis observados em cada ocasião.

Percebe-se que a qualidade da calibragem foi boa para toda a faixa de vazões simuladas, que cobriu o intervalo de estiagem severa (vazões da ordem de 3.000 m<sup>3</sup>/s) até cheias, com vazões da ordem de 36.000 m<sup>3</sup>/s.

Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio

Figura 3.3.  
Resultados da Calibração dos Perfis de Linha d'Água  
(vazões em Porto Velho = 2.682 m³/s e 23.457 m³/s)

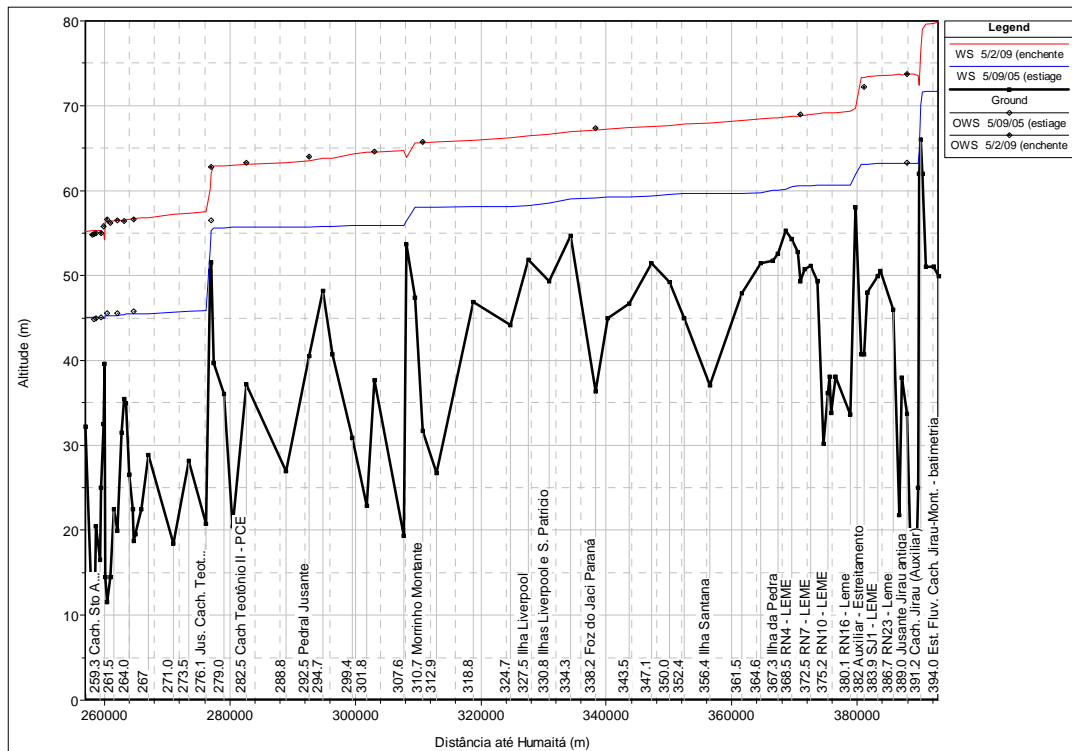


Figura 3.4.  
Resultados da Calibração dos Perfis de Linha d'Água  
(vazões em Porto Velho = 3.455 m³/s e 25.024 m³/s)

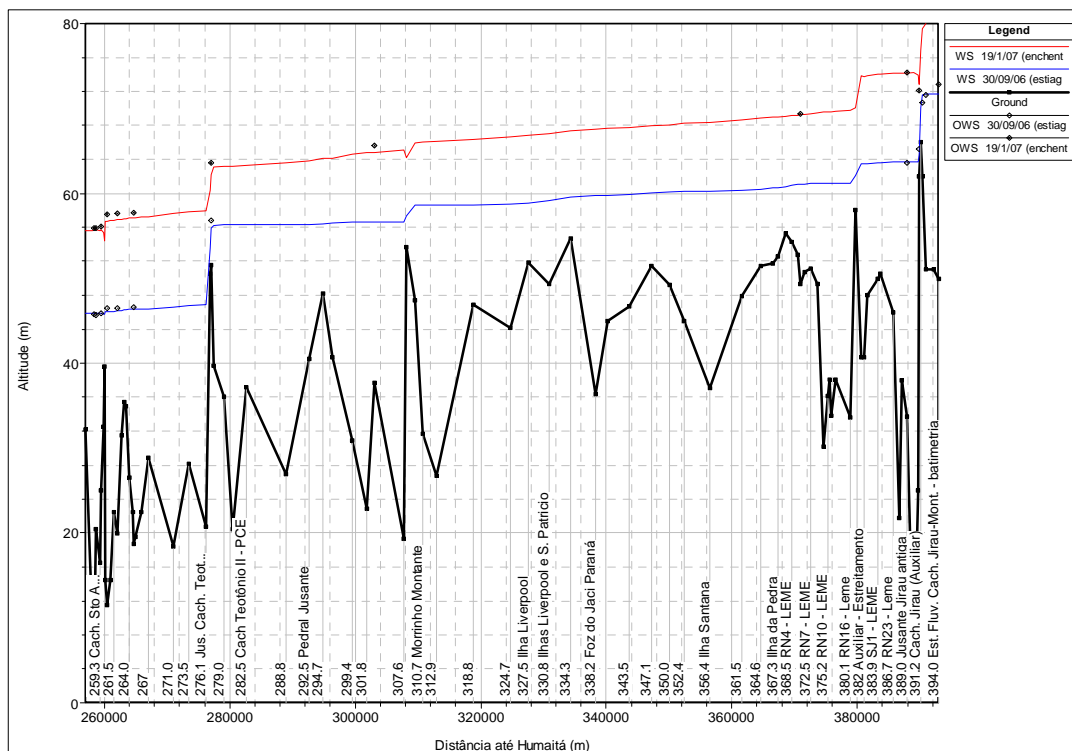


Figura 3.5.  
Resultados da Calibração dos Perfis de Linha d'Água  
(vazões em Porto Velho = 11.001 m<sup>3</sup>/s e 26.299 m<sup>3</sup>/s)

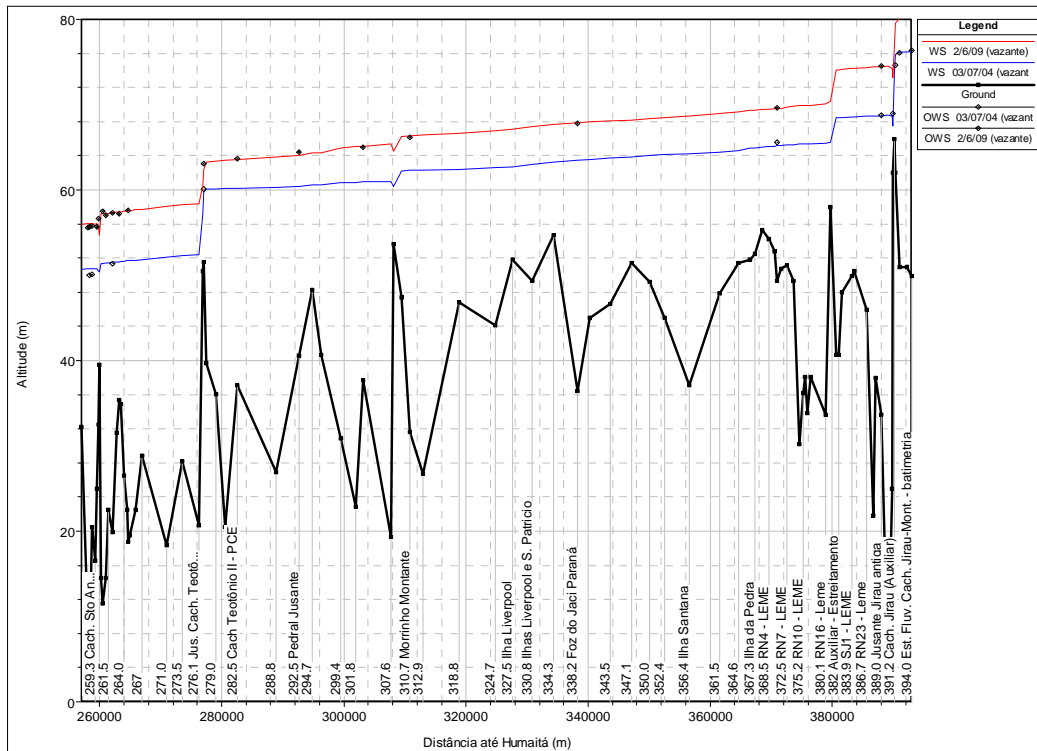
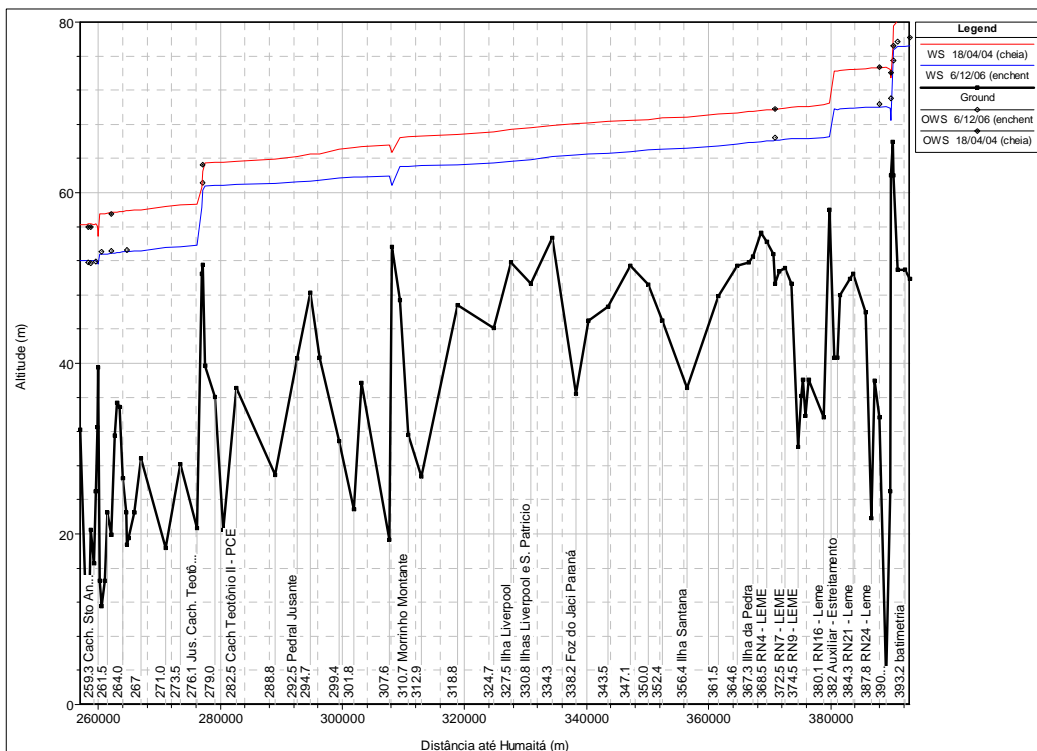


Figura 3.6.  
Resultados da Calibração dos Perfis de Linha d'Água  
(vazões em Porto Velho = 13.751 m<sup>3</sup>/s e 27.286 m<sup>3</sup>/s)



Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio

Figura 3.7.  
Resultados da Calibração dos Perfis de Linha d'Água  
(vazões em Porto Velho = 15.686 m<sup>3</sup>/s e 32.162 m<sup>3</sup>/s)

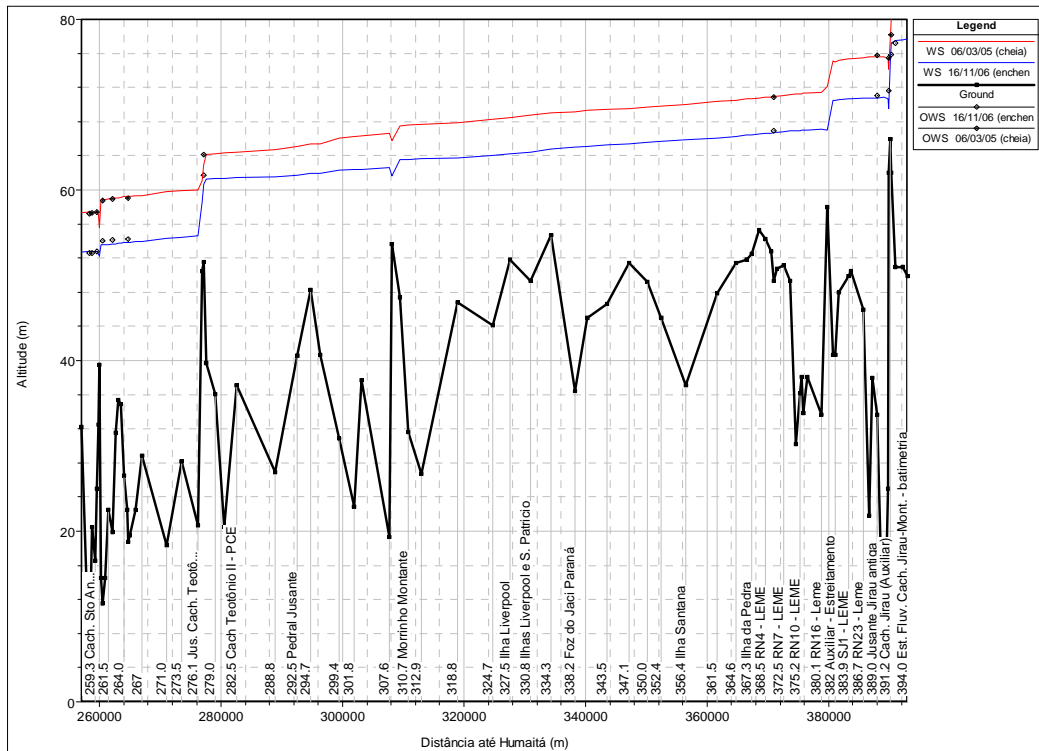
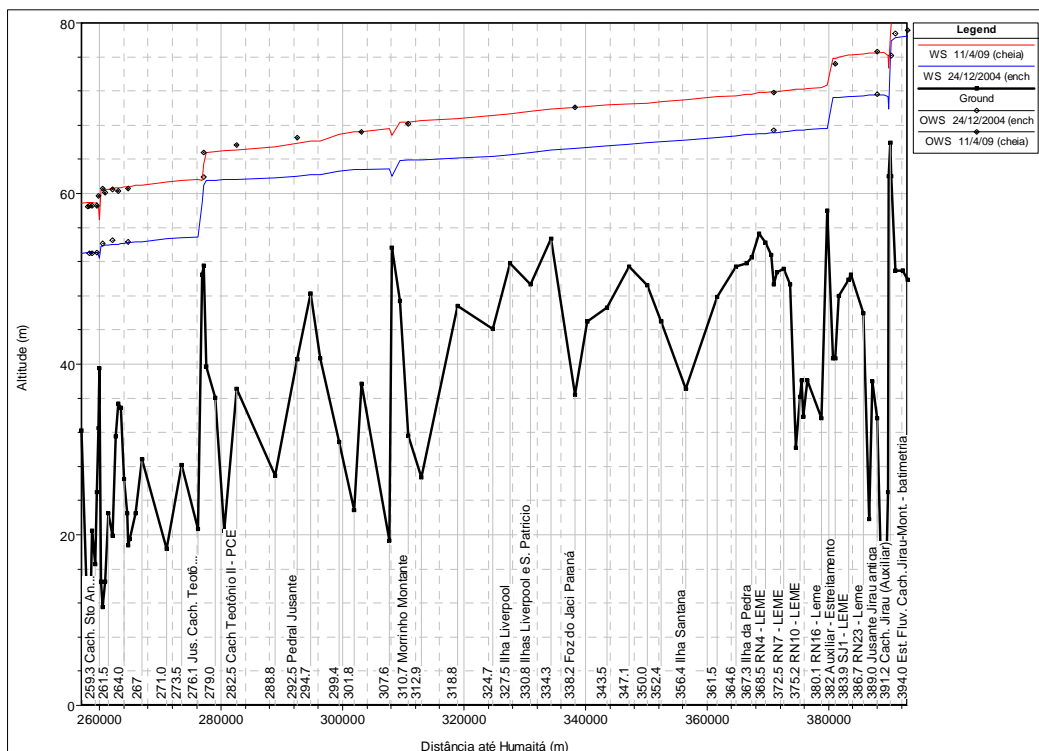


Figura 3.8.  
Resultados da Calibração dos Perfis de Linha d'Água  
(vazões em Porto Velho = 16.871 m<sup>3</sup>/s e 36.817 m<sup>3</sup>/s)



### 3.3. Validação do Modelo em Condições Naturais

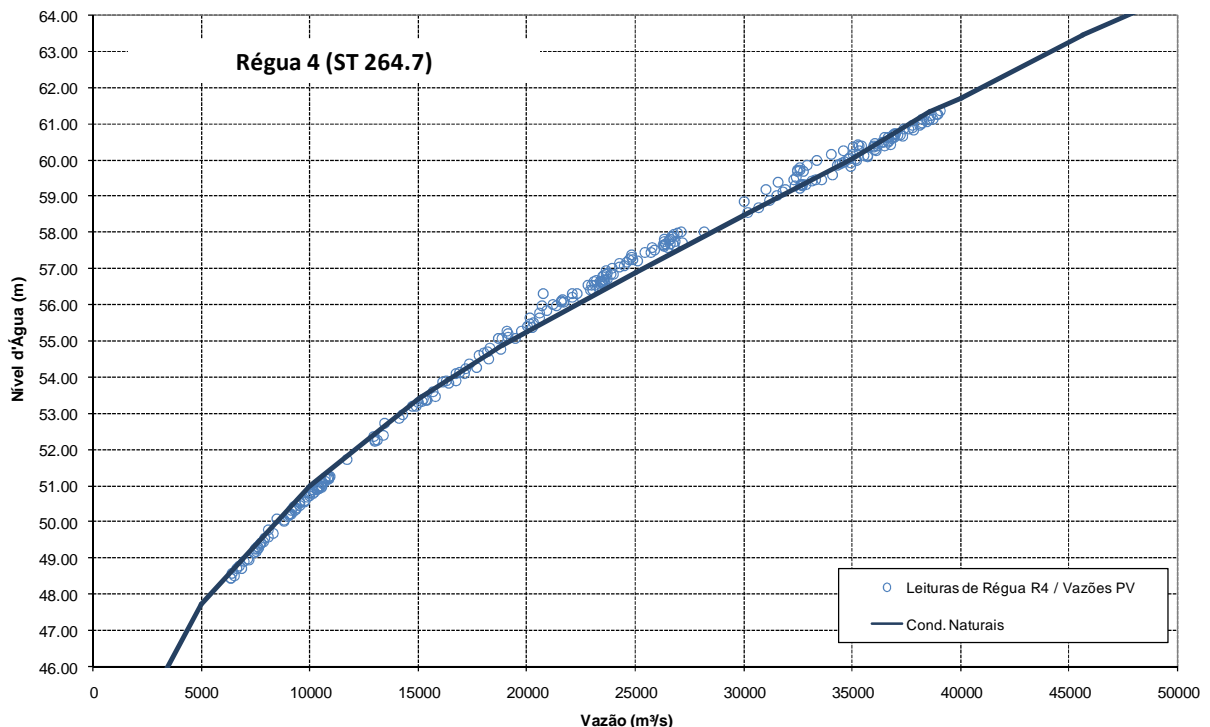
De posse do modelo calibrado, foram feitas diversas simulações de perfis de linha d'água do rio Madeira para o trecho modelado, cobrindo toda a gama de vazões em trânsito, desde 2.000 m<sup>3</sup>/s até a cheia decamilenar, passando pela vazão média de longo termo e pelas vazões de cheia com diversos tempos de recorrência.

Como forma de validar o modelo calibrado, foram utilizadas as seções onde se dispõe de estações fluviométricas para confrontar as curvas-chave resultantes da modelagem com as curvas-chave definidas a partir das observações de nível d'água nos locais de interesse e das vazões observadas nos postos fluviométricos existentes, devidamente transferidas para cada local.

Pode-se afirmar que o modelo implementado é confiável para a simulação de perfis de linha d'água nas condições atuais.

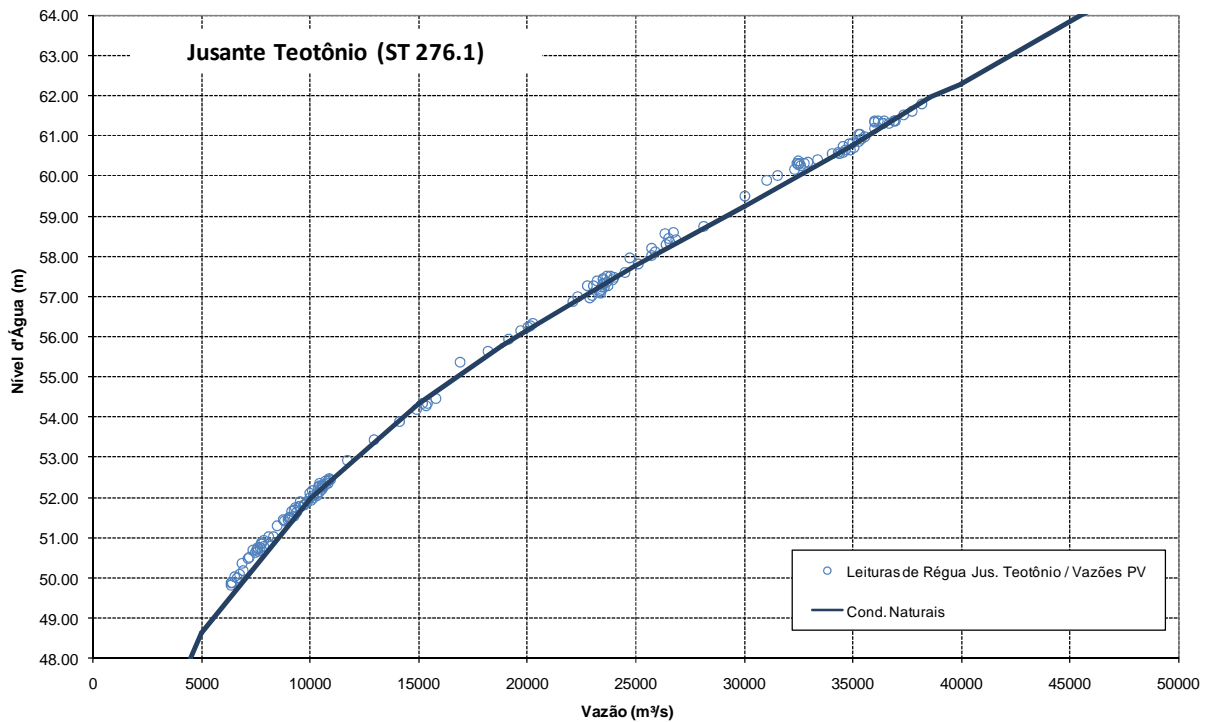
As figuras a seguir mostram algumas dessas curvas-chave nos locais mais importantes para os estudos de remanso. O local preciso de cada seção pode ser visualizado através de consulta ao desenho PJ0696-Z-H41-GR-DE-103-1A (Anexo II).

**Figura 3.9.  
Curva-Chave Obtida na Seção 264,7 – Régua R4**

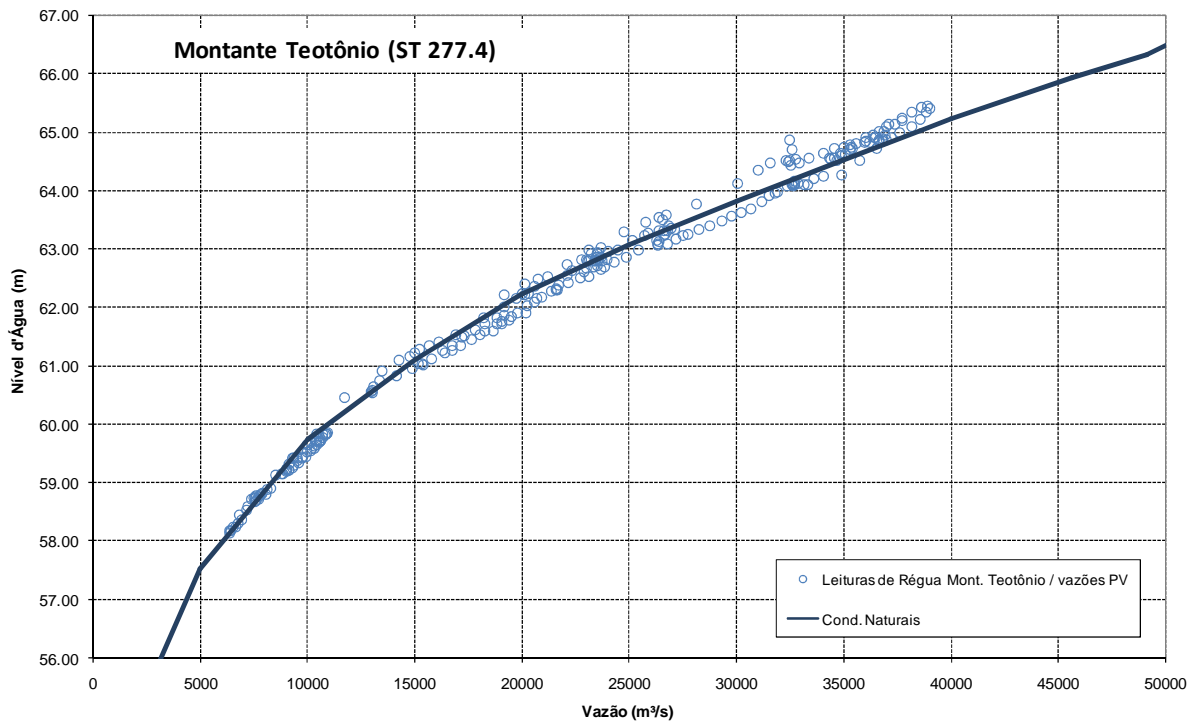




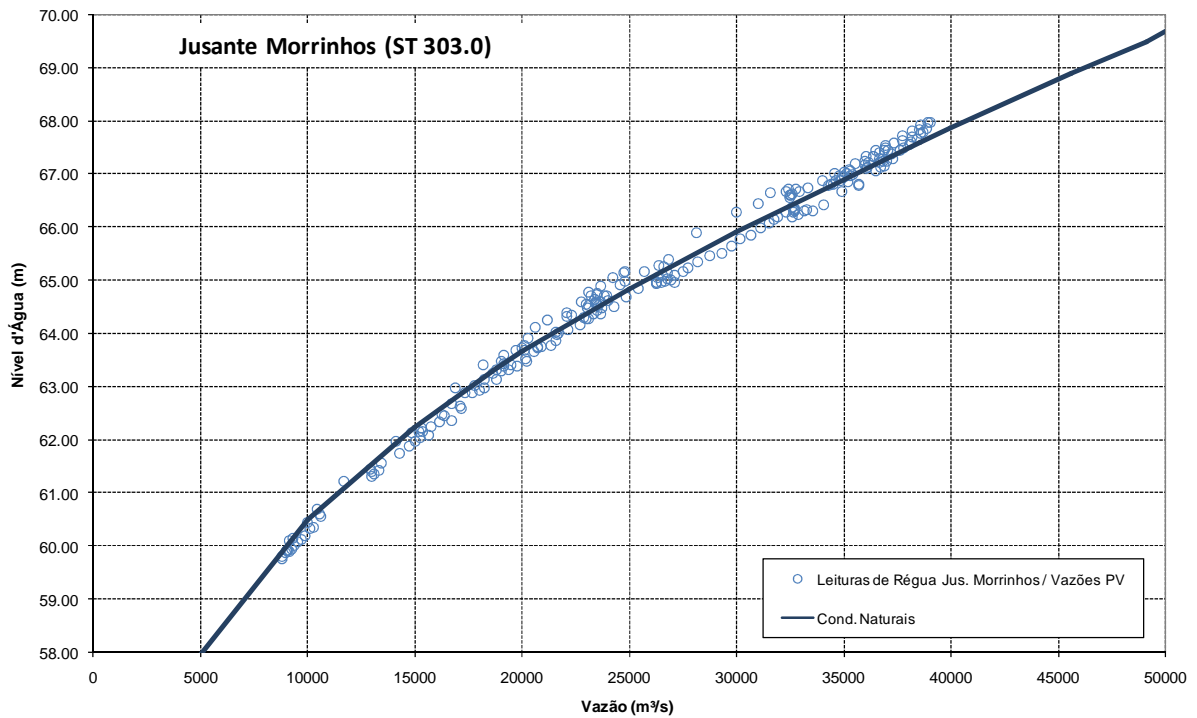
**Figura 3.10.**  
**Curva-Chave Obtida na Seção 276,1 – Teotônio Jusante**



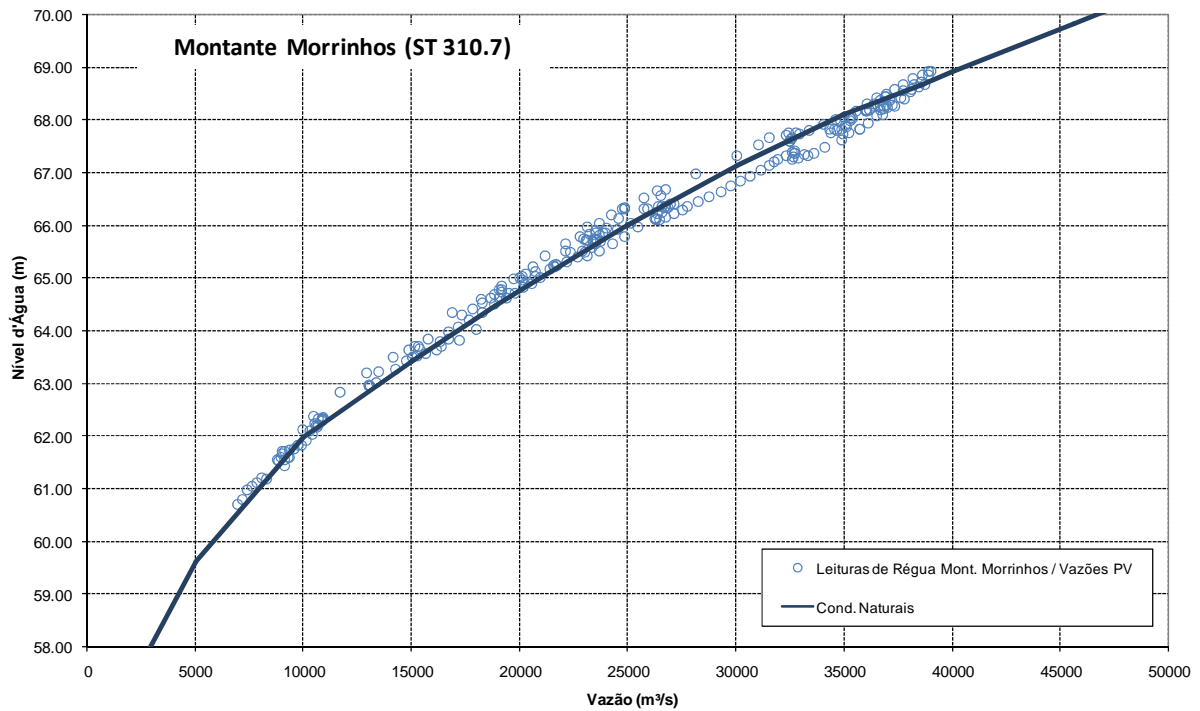
**Figura 3.11.**  
**Curva-Chave Obtida na Seção 277,4 – Teotônio Montante**



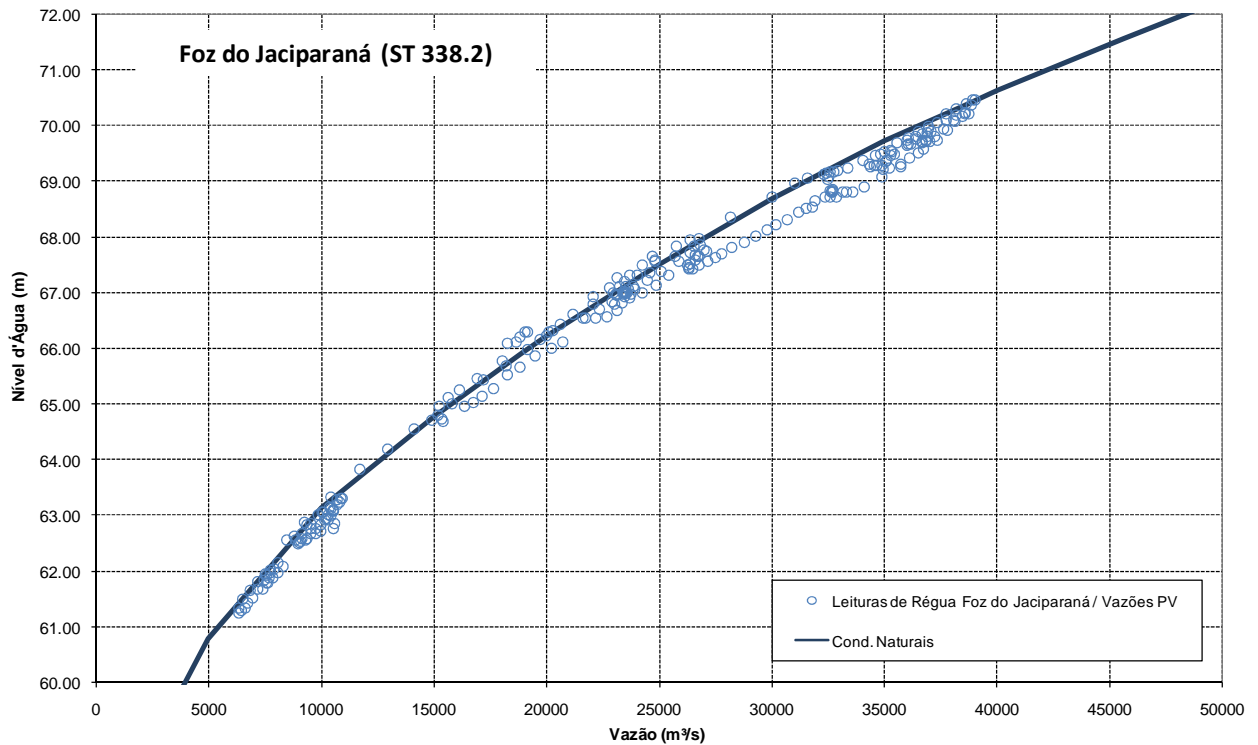
**Figura 3.12.**  
**Curva-Chave Obtida na Seção 303,0 – Morrinho Jusante**



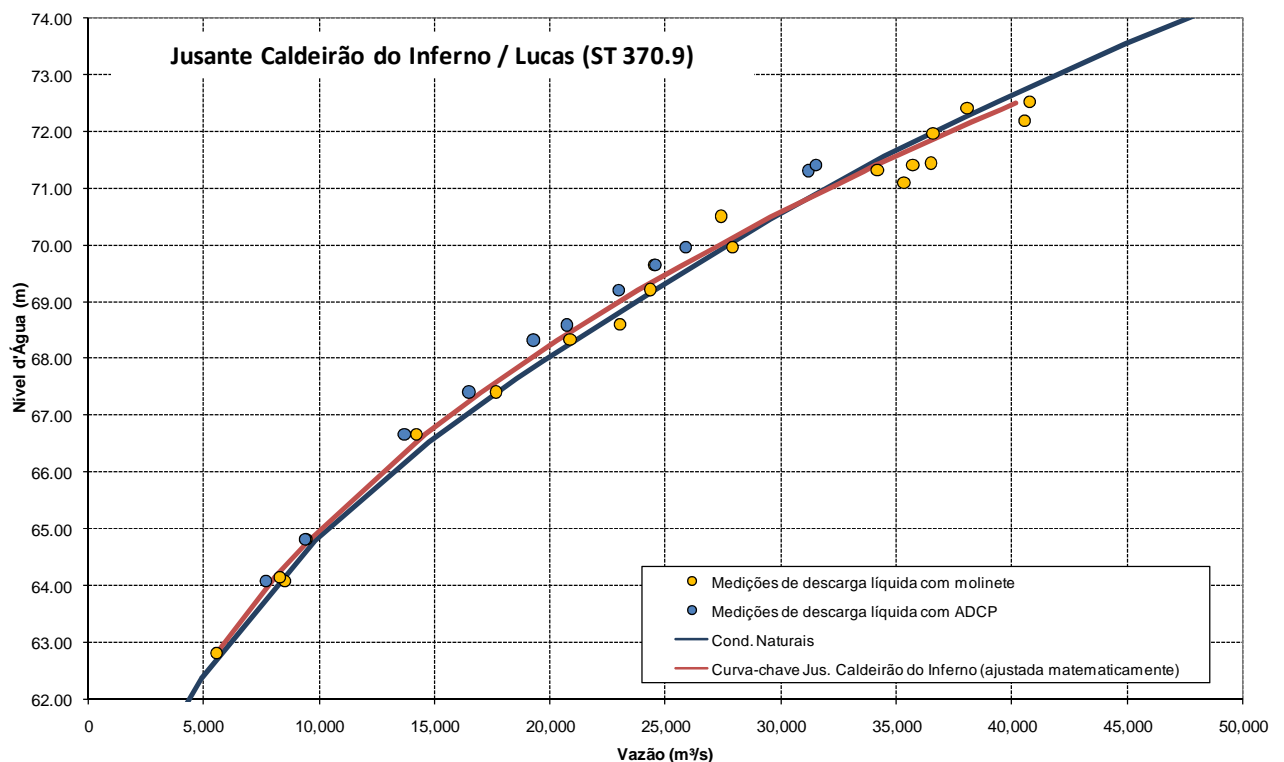
**Figura 3.13.**  
**Curva-Chave Obtida na Seção 310,7 – Morrinho Montante**



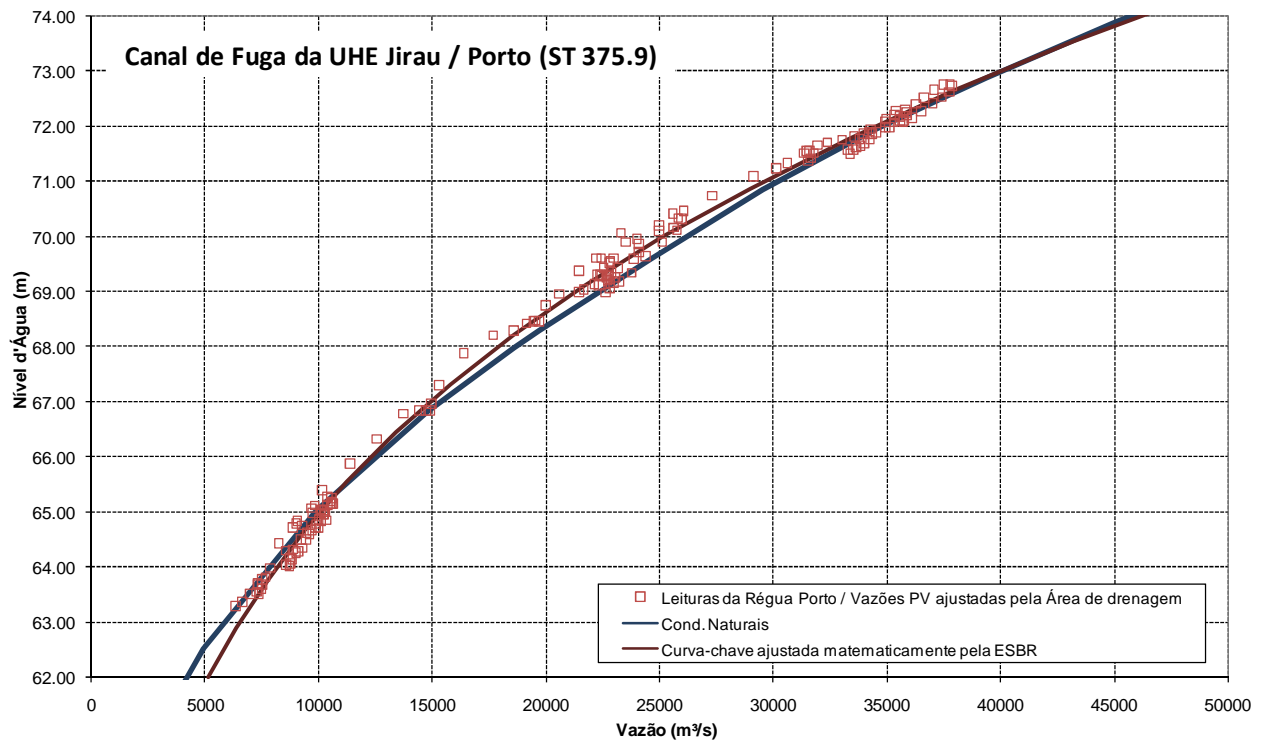
**Figura 3.14.**  
**Curva-Chave Obtida na Seção 338,2 – Foz do Jaciparaná**



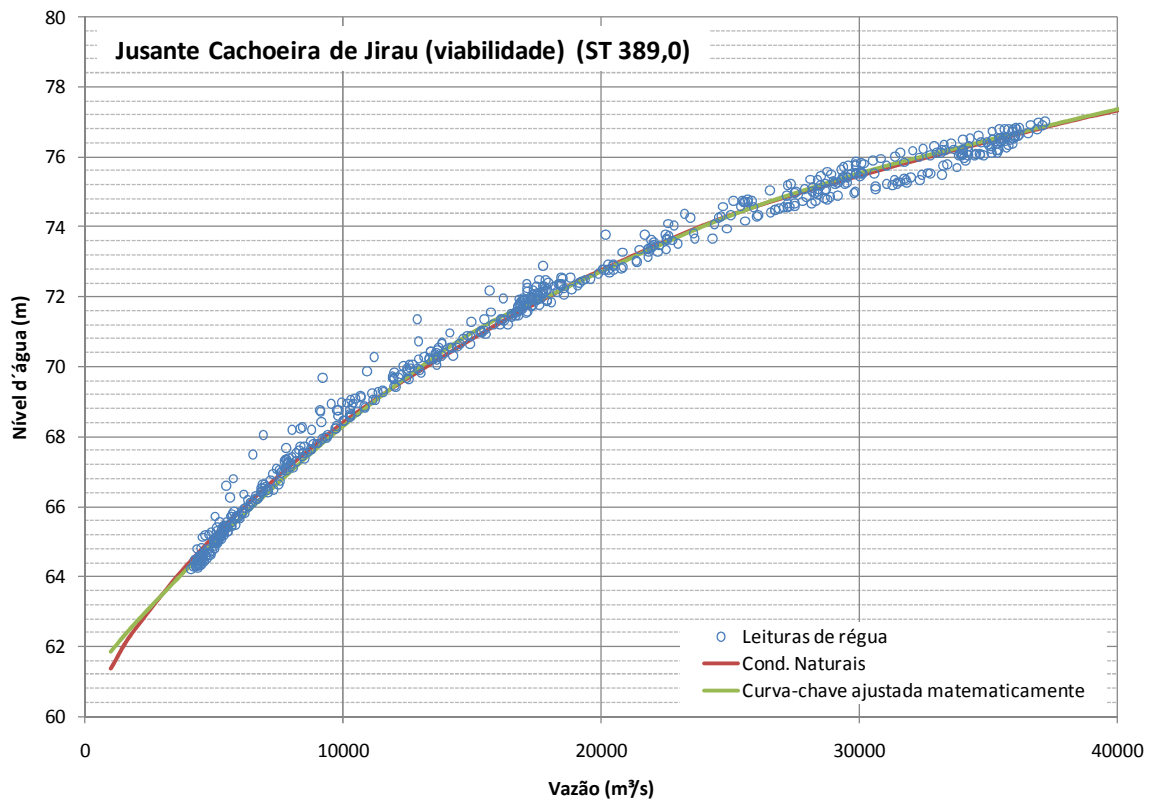
**Figura 3.15.**  
**Curva-Chave Obtida na Seção 370,9 – Jusante Caldeirão do Inferno**



**Figura 3.16.**  
**Curva-Chave Obtida na Seção 375,9 – Canal de Fuga da UHE Jirau**



**Figura 3.17.**  
**Curva-Chave Obtida na Seção 389,0 – Jusante Cachoeira de Jirau (viabilidade)**



### 3.4. Coeficientes de Rugosidade para a Situação com Reservatório

Para as simulações dos perfis da linha d'água com o reservatório foram considerados, nos diferentes trechos, os valores dos coeficientes de Manning indicados pelas extrapolações citadas no item 3.2, conforme mostra o quadro abaixo:

**Quadro 3.5.**  
**Resultados da Calibração – Topologia e Coeficientes de Manning**  
**Condições Naturais e com o Reservatório**

Trecho do rio	Coeficiente de Manning	
	Canal Natural	Com Reservatório*
Santo Antônio – Jusante Teotônio	0,035–0,048	0,0321
Montante Teotônio – Jusante Morrinho	0,034–0,036	0,034
Montante Morrinho – Foz do Jaciparaná	0,027–0,033	0,023–0,0275
Foz do Jaciparaná – Jusante Cachoeira Caldeirão do Inferno	0,021–0,032	0,019–0,0245
Jusante Cach Caldeirão do Inferno–Cach Caldeirão do Inferno	0,031–0,042	0,031–0,040
Cachoeira Caldeirão do Inferno – Jusante Cachoeira de Jirau	0,0322 - 0,045	0,0322 - 0,033

\* Valores extrapolados utilizados entre a cota 70,0 m e o nível d'água máximo simulados com o reservatório.

### 3.5. Perfis de Linha d'Água com o Reservatório

Uma vez validado o modelo de remanso, foram simulados os perfis de linha d'água ao longo do reservatório de Santo Antônio, considerando as condições atual, sem o reservatório, e futura, com reservatório operando nas cotas 70,0 m, 70,5 m, 71,0 m e 72,0 m.

Para a situação atual, as simulações partiram da localidade de Humaitá (seção transversal 0,0 km), aplicando-se como condição de contorno os níveis d'água obtidos através da curva-chave da estação fluviométrica Humaitá. Vale lembrar que o domínio de modelagem do modelo se estende até a localidade de Humaitá porque o mesmo será também utilizado como ferramenta para subsidiar os estudos hidrossedimentológicos da UHE Santo Antônio.

Para a situação futura, com o reservatório implantado, os níveis d'água junto à barragem foram impostos na seção 259,5, correspondente ao eixo da barragem de Santo Antônio.

De modo a organizar os resultados e permitir maior facilidade nas análises, foram preparadas tabelas com o resumo dos perfis de nível d'água ao longo do estirão em estudo, para algumas vazões características.

Os Quadros a seguir apresentam os resultados obtidos para os perfis de linha d'água considerando o rio Madeira em condições naturais e depois da implantação do reservatório (NA = 70,5m).

Na sequência, as figuras ilustram, a título de exemplo, para os diversos eventos simulados, os perfis de linha d'água nas condições atuais e futuras, com o reservatório operando na cota 70,5 m. A Figura 3.18 apresenta os perfis associados a uma vazão baixa (5.000 m<sup>3</sup>/s em Porto Velho) e a vazão média de longo termo em Porto Velho (QMLT = 18.850 m<sup>3</sup>/s), enquanto que a Figura 3.19 mostra o perfil correspondente à vazão média das máximas anuais em Porto Velho (Q = 38.550 m<sup>3</sup>/s) e perfil para uma vazão com 5 anos de recorrência, TR = 5 anos (Q = 45.627 m<sup>3</sup>/s). Por último, as Figuras 3.20 e 3.21 apresentam os perfis da linha d'água associados a tempos de recorrência de 10, 25, 50 e 100 anos, que representam, respectivamente, as vazões Q = 49.156 m<sup>3</sup>/s, Q = 53.667 m<sup>3</sup>/s, Q = 57.031 m<sup>3</sup>/s, Q = 60.379 m<sup>3</sup>/s.

**Quadro 3.6.**  
**Perfis de Linha d'Água em Condições Naturais e Com Reservatório**

Seção	Cota do fundo	Q = 5000 m³/s		QMLT (Q = 18.850 m³/s)		Cheia anual (Q = 38.550 m³/s)		TR = 5 anos (Q = 45.627 m³/s)	
		Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m
		259.5	25.00	47.32	70.50	53.82	70.50	59.11	70.50
259.8	32.50	47.18	70.50	53.56	70.49	58.80	70.47	60.74	70.45
260.0	39.55	47.18	70.50	53.00	70.51	56.87	70.53	58.54	70.55
260.2	14.50	47.64	70.50	54.68	70.51	60.73	70.54	62.78	70.56
260.5	11.50	47.65	70.50	54.68	70.51	60.75	70.55	62.80	70.57
261.0	14.50	47.66	70.50	54.72	70.52	60.83	70.57	62.87	70.59
261.5	22.50	47.67	70.50	54.74	70.52	60.86	70.58	62.92	70.62
262.1	19.91	47.73	70.50	54.83	70.53	60.98	70.60	63.04	70.64
262.7	31.50	47.77	70.50	54.85	70.53	60.99	70.60	63.04	70.64
263.1	35.40	47.83	70.50	54.89	70.53	61.03	70.61	63.08	70.65
263.4	34.90	47.87	70.50	54.93	70.53	61.07	70.61	63.13	70.66
264.0	26.50	47.92	70.50	54.99	70.54	61.15	70.63	63.20	70.68
264.5	22.50	47.93	70.50	55.01	70.54	61.17	70.64	63.23	70.70
264.7	18.78	47.93	70.50	55.03	70.54	61.19	70.64	63.24	70.70
264.9	19.50	47.94	70.50	55.02	70.54	61.16	70.63	63.21	70.68
265.9	22.50	47.97	70.50	55.10	70.55	61.29	70.67	63.34	70.73
267.0	28.89	48.02	70.50	55.14	70.55	61.30	70.68	63.36	70.75
271.0	18.41	48.28	70.51	55.50	70.58	61.69	70.77	63.76	70.88
273.5	28.20	48.43	70.51	55.64	70.59	61.87	70.84	63.95	70.97
276.1	20.71	48.62	70.51	55.76	70.60	61.96	70.85	64.02	70.99
276.8	50.50	54.37	70.51	59.14	70.56	61.64	70.70	62.44	70.78
277.0	51.50	57.20	70.51	61.33	70.56	63.64	70.68	64.26	70.75
277.4	39.69	57.53	70.51	61.97	70.64	65.01	71.00	65.93	71.20
279.0	36.07	57.55	70.51	62.03	70.65	65.14	71.03	66.06	71.23
280.4	20.49	57.57	70.52	62.08	70.66	65.23	71.06	66.17	71.28
282.5	37.12	57.58	70.52	62.15	70.68	65.39	71.15	66.38	71.40
288.8	26.97	57.63	70.52	62.34	70.72	65.73	71.26	66.77	71.54
292.5	40.55	57.67	70.52	62.52	70.76	66.12	71.43	67.22	71.78
294.7	48.23	57.76	70.53	62.74	70.80	66.49	71.58	67.64	71.97
296.2	40.68	57.80	70.53	62.76	70.79	66.42	71.53	67.52	71.91
299.4	30.91	57.92	70.53	63.19	70.89	67.26	71.89	68.49	72.38
301.8	22.87	57.95	70.54	63.31	70.92	67.50	72.01	68.78	72.53
303.0	37.71	57.95	70.54	63.34	70.94	67.59	72.09	68.88	72.64
307.6	19.32	57.99	70.54	63.50	70.99	67.93	72.27	69.28	72.87
308.0	53.64	57.92	70.54	62.62	70.95	67.30	72.14	68.80	72.71
309.4	47.39	59.60	70.54	64.41	71.03	68.61	72.38	69.80	73.01
310.7	31.65	59.62	70.54	64.46	71.03	68.65	72.37	69.83	72.98
312.9	26.70	59.63	70.55	64.54	71.06	68.82	72.46	70.01	73.09
318.8	46.84	59.66	70.55	64.67	71.10	69.06	72.60	70.29	73.28
324.7	44.11	59.76	70.55	64.94	71.15	69.42	72.73	70.67	73.42
327.5	51.82	59.88	70.56	65.13	71.19	69.67	72.85	70.93	73.58

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

Seção	Cota do fundo	Q = 5000 m <sup>3</sup> /s		QMLT (Q = 18.850 m <sup>3</sup> /s)		Cheia anual (Q = 38.550 m <sup>3</sup> /s)		TR = 5 anos (Q = 45.627 m <sup>3</sup> /s)	
		Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m
330.8	49.31	60.16	70.56	65.40	71.23	69.91	72.95	71.16	73.68
334.3	54.70	60.58	70.56	65.70	71.28	70.23	73.06	71.43	73.79
338.2	36.40	60.79	70.57	65.91	71.30	70.39	73.11	71.58	73.85
340.2	44.98	60.85	70.57	66.01	71.33	70.51	73.19	71.72	73.95
343.5	46.65	60.96	70.57	66.17	71.37	70.71	73.28	71.92	74.04
347.1	51.40	61.12	70.57	66.31	71.38	70.80	73.30	71.99	74.06
350.0	49.26	61.32	70.58	66.49	71.41	70.94	73.37	72.13	74.14
352.4	45.00	61.39	70.58	66.63	71.44	71.10	73.43	72.27	74.20
356.4	37.07	61.44	70.58	66.76	71.48	71.28	73.62	72.46	74.46
361.5	47.87	61.55	70.59	67.05	71.59	71.72	73.77	72.97	74.61
364.6	51.40	61.73	70.59	67.23	71.61	71.82	73.81	73.04	74.63
366.5	51.79	62.01	70.60	67.41	71.66	72.01	73.93	73.25	74.80
367.3	52.53	62.06	70.60	67.42	71.65	71.97	73.92	73.20	74.78
367.5	55.30	62.13	70.60	67.51	71.70	72.16	74.04	73.44	74.93
368.5	54.23	62.26	70.60	67.58	71.71	72.23	74.07	73.50	74.95
370.5	52.80	62.34	70.60	67.62	71.72	72.25	74.08	73.52	74.96
370.9	49.34	62.37	70.60	67.65	71.72	72.25	74.10	73.55	74.98
371.5	50.78	62.38	70.60	67.67	71.73	72.27	74.08	73.52	74.95
372.5	51.12	62.44	70.61	67.78	71.76	72.39	74.16	73.65	75.06
373.5	49.30	62.49	70.61	67.87	71.79	72.48	74.22	73.73	75.13
374.5	30.18	62.50	70.61	67.94	71.82	72.58	74.28	73.83	75.24
375.2	36.19	62.51	70.61	67.95	71.82	72.57	74.28	73.83	75.24
375.5	38.10	62.51	70.61	67.95	71.82	72.58	74.29	73.84	75.25
375.9	33.82	62.51	70.62	67.98	71.83	72.62	74.32	73.88	75.29
376.5	38.10	62.52	70.62	67.99	71.83	72.63	74.32	73.89	75.29
380.1	33.62	62.55	70.62	68.09	71.88	72.78	74.44	74.07	75.45
380.8	58.00	63.01	70.54	68.16	70.83	72.98	72.98	74.08	74.08
381.7	40.70	64.96	70.67	71.89	72.53	76.21	76.21	77.17	77.17
382.0	40.70	64.95	70.67	71.86	72.51	76.13	76.13	77.07	77.07
382.2	47.99	64.97	70.68	71.94	72.58	76.35	76.35	77.35	77.35
383.9	49.88	65.03	70.68	72.03	72.66	76.58	76.58	77.64	77.64
384.3	50.51	65.07	70.69	72.05	72.67	76.58	76.58	77.64	77.64
386.7	45.97	65.12	70.70	72.14	72.75	76.70	76.70	77.75	77.75
387.8	21.82	65.13	70.70	72.20	72.80	76.84	76.84	77.93	77.93
388.2	38.00	65.13	70.70	72.18	72.78	76.79	76.79	77.86	77.86
389.0	33.70	65.14	70.70	72.19	72.80	76.83	76.83	77.92	77.92



**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

**Quadro 3.7.  
Perfis de Linha d'Água em Condições Naturais e Com Reservatório (Cont.)**

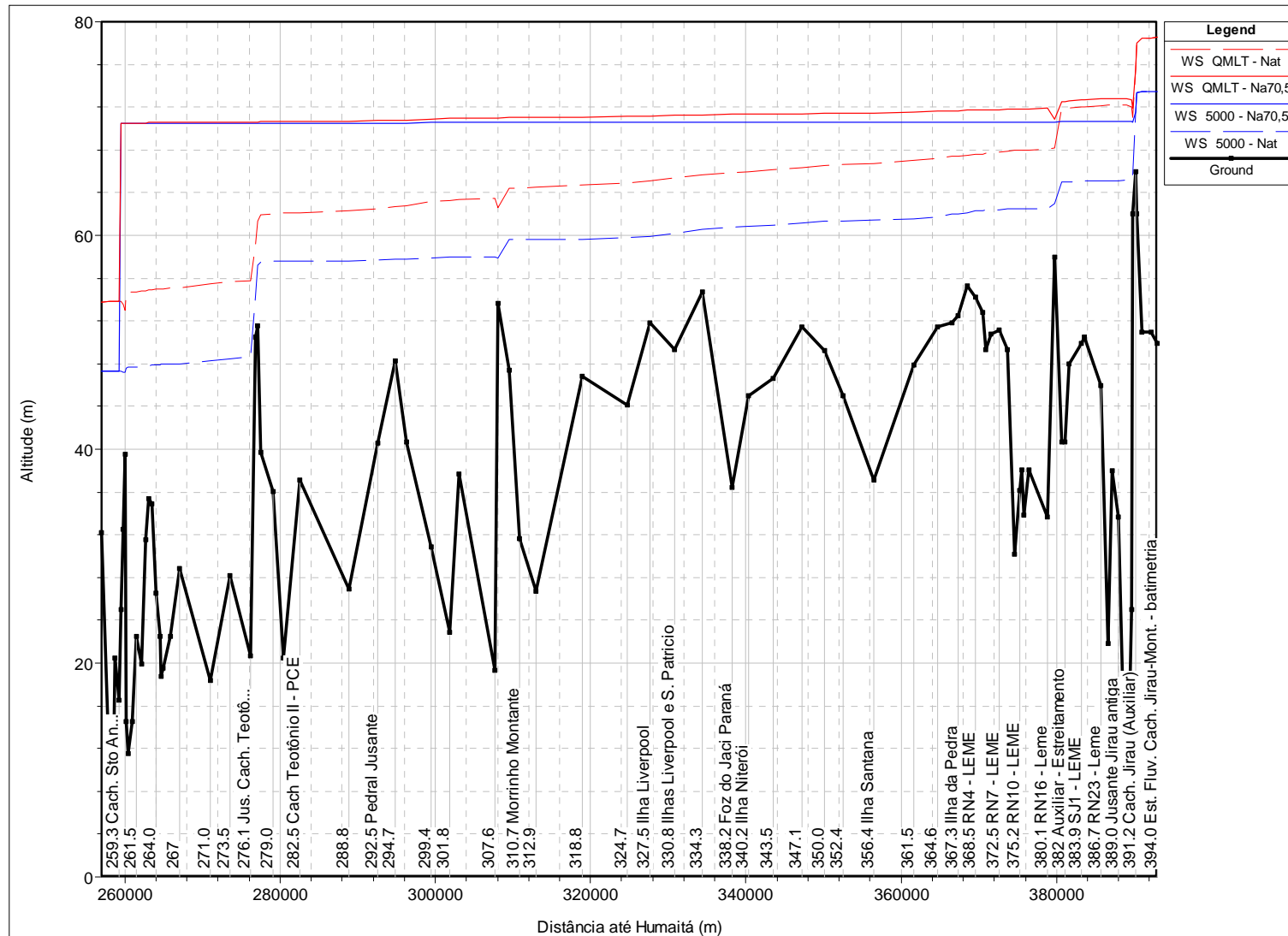
Seção	Cota do fundo	TR = 10 anos (Q = 49.156 m³/s)		TR = 25 anos (Q = 53.667 m³/s)		TR = 50 anos (Q = 57.031 m³/s)		TR = 100 anos (Q = 60.379 m³/s)	
		Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m
259.5	25.00	61.81	70.50	62.76	70.50	63.45	70.50	64.12	70.50
259.8	32.50	61.53	70.44	62.50	70.43	63.19	70.42	63.86	70.41
260.0	39.55	59.16	70.56	59.92	70.57	60.50	70.58	61.12	70.59
260.2	14.50	63.66	70.56	64.73	70.58	65.48	70.59	66.20	70.60
260.5	11.50	63.69	70.59	64.77	70.60	65.53	70.62	66.25	70.63
261.0	14.50	63.77	70.61	64.85	70.63	65.61	70.65	66.33	70.67
261.5	22.50	63.82	70.64	64.91	70.66	65.67	70.69	66.39	70.71
262.1	19.91	63.93	70.67	65.02	70.70	65.78	70.73	66.50	70.75
262.7	31.50	63.94	70.66	65.02	70.70	65.78	70.72	66.50	70.75
263.1	35.40	63.98	70.67	65.06	70.70	65.82	70.73	66.53	70.76
263.4	34.90	64.02	70.69	65.11	70.72	65.86	70.75	66.57	70.78
264.0	26.50	64.10	70.71	65.18	70.75	65.94	70.78	66.64	70.82
264.5	22.50	64.12	70.73	65.20	70.77	65.97	70.81	66.68	70.85
264.7	18.78	64.14	70.73	65.22	70.78	65.99	70.81	66.70	70.85
264.9	19.50	64.10	70.71	65.18	70.75	65.94	70.78	66.65	70.81
265.9	22.50	64.24	70.77	65.33	70.82	66.10	70.86	66.81	70.91
267.0	28.89	64.26	70.79	65.35	70.84	66.12	70.88	66.84	70.93
271.0	18.41	64.67	70.94	65.76	71.02	66.53	71.09	67.26	71.16
273.5	28.20	64.87	71.05	65.97	71.15	66.75	71.23	67.48	71.32
276.1	20.71	64.93	71.06	66.03	71.17	66.80	71.25	67.53	71.34
276.8	50.50	63.63	70.83	65.02	70.89	65.91	70.94	66.71	70.99
277.0	51.50	64.45	70.79	65.32	70.85	66.13	70.89	66.84	70.94
277.4	39.69	66.31	71.30	67.16	71.45	67.85	71.57	68.48	71.70
279.0	36.07	66.45	71.34	67.30	71.50	67.98	71.62	68.61	71.75
280.4	20.49	66.57	71.40	67.42	71.56	68.10	71.69	68.73	71.83
282.5	37.12	66.80	71.54	67.67	71.73	68.37	71.88	69.01	72.04
288.8	26.97	67.22	71.70	68.08	71.91	68.77	72.08	69.40	72.25
292.5	40.55	67.70	71.97	68.58	72.22	69.28	72.42	69.94	72.63
294.7	48.23	68.14	72.19	69.03	72.48	69.74	72.70	70.39	72.93
296.2	40.68	68.00	72.12	68.90	72.39	69.61	72.61	70.26	72.83
299.4	30.91	69.05	72.63	70.06	72.98	70.77	73.24	71.39	73.51
301.8	22.87	69.35	72.81	70.37	73.18	71.09	73.46	71.72	73.75
303.0	37.71	69.48	72.94	70.51	73.33	71.25	73.63	71.91	73.93
307.6	19.32	69.90	73.19	70.96	73.61	71.70	73.93	72.36	74.26
308.0	53.64	69.45	73.02	70.57	73.42	71.35	73.74	72.02	74.05
309.4	47.39	70.37	73.34	71.33	73.77	72.03	74.10	72.65	74.43
310.7	31.65	70.38	73.30	71.32	73.72	72.00	74.05	72.61	74.37
312.9	26.70	70.59	73.42	71.53	73.86	72.21	74.19	72.82	74.52
318.8	46.84	70.88	73.64	71.81	74.10	72.54	74.45	73.17	74.80
324.7	44.11	71.26	73.78	72.19	74.24	72.82	74.58	73.42	74.93

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

Seção	Cota do fundo	TR = 10 anos (Q = 49.156 m³/s)		TR = 25 anos (Q = 53.667 m³/s)		TR = 50 anos (Q = 57.031 m³/s)		TR = 100 anos (Q = 60.379 m³/s)	
		Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m	Natural	NA 70,5m
327.5	51.82	71.53	73.95	72.45	74.43	73.08	74.79	73.70	75.15
330.8	49.31	71.75	74.05	72.67	74.53	73.29	74.89	73.87	75.25
334.3	54.70	72.01	74.17	72.90	74.65	73.49	75.00	74.05	75.36
338.2	36.40	72.14	74.23	73.01	74.70	73.60	75.06	74.14	75.42
340.2	44.98	72.29	74.33	73.16	74.82	73.75	75.18	74.30	75.56
343.5	46.65	72.48	74.43	73.33	74.92	73.91	75.28	74.45	75.66
347.1	51.40	72.54	74.44	73.38	74.92	73.94	75.29	74.47	75.66
350.0	49.26	72.68	74.53	73.51	75.02	74.07	75.39	74.61	75.77
352.4	45.00	72.82	74.59	73.63	75.07	74.18	75.43	74.69	75.80
356.4	37.07	73.01	74.87	73.99	75.40	74.57	75.80	75.12	76.20
361.5	47.87	73.55	75.02	74.25	75.55	74.80	75.94	75.33	76.34
364.6	51.40	73.61	75.04	74.29	75.56	74.83	75.94	75.35	76.33
366.5	51.79	73.83	75.22	74.53	75.75	75.08	76.14	75.60	76.54
367.3	52.53	73.76	75.20	74.51	75.73	75.06	76.12	75.57	76.52
367.5	55.30	74.05	75.36	74.72	75.90	75.27	76.30	75.79	76.70
368.5	54.23	74.09	75.37	74.76	75.90	75.30	76.30	75.80	76.70
370.5	52.80	74.11	75.38	74.77	75.91	75.31	76.31	75.82	76.71
370.9	49.34	74.14	75.41	74.81	75.94	75.35	76.34	75.86	76.75
371.5	50.78	74.11	75.37	74.76	75.90	75.30	76.29	75.80	76.69
372.5	51.11	74.24	75.49	74.91	76.03	75.46	76.44	75.97	76.84
373.5	49.30	74.33	75.57	75.01	76.12	75.57	76.53	76.08	76.93
374.5	30.18	74.44	75.69	75.16	76.25	75.73	76.67	76.25	77.09
375.2	36.19	74.43	75.69	75.17	76.25	75.73	76.67	76.25	77.09
375.5	38.10	74.44	75.70	75.18	76.26	75.75	76.68	76.26	77.09
375.9	33.82	74.49	75.74	75.24	76.31	75.80	76.73	76.32	77.15
376.5	38.10	74.50	75.75	75.24	76.31	75.81	76.73	76.33	77.15
380.1	33.62	74.69	75.92	75.46	76.51	76.04	76.94	76.57	77.38
380.8	58.00	74.55	74.55	75.21	75.21	75.47	75.47	75.71	75.71
381.7	40.70	77.57	77.57	78.01	78.01	78.31	78.31	78.61	78.61
382.0	40.70	77.46	77.46	77.89	77.89	78.18	78.18	78.47	78.47
382.2	47.98	77.78	77.78	78.25	78.25	78.58	78.58	78.90	78.90
383.9	49.88	78.10	78.10	78.60	78.60	78.95	78.95	79.30	79.30
384.3	50.51	78.09	78.09	78.59	78.59	78.94	78.94	79.29	79.29
386.7	45.97	78.20	78.20	78.70	78.70	79.05	79.05	79.39	79.39
387.8	21.82	78.39	78.39	78.92	78.92	79.28	79.28	79.64	79.64
388.2	38.00	78.32	78.32	78.83	78.83	79.19	79.19	79.54	79.54
389.0	33.70	78.38	78.38	78.91	78.91	79.28	79.28	79.63	79.63

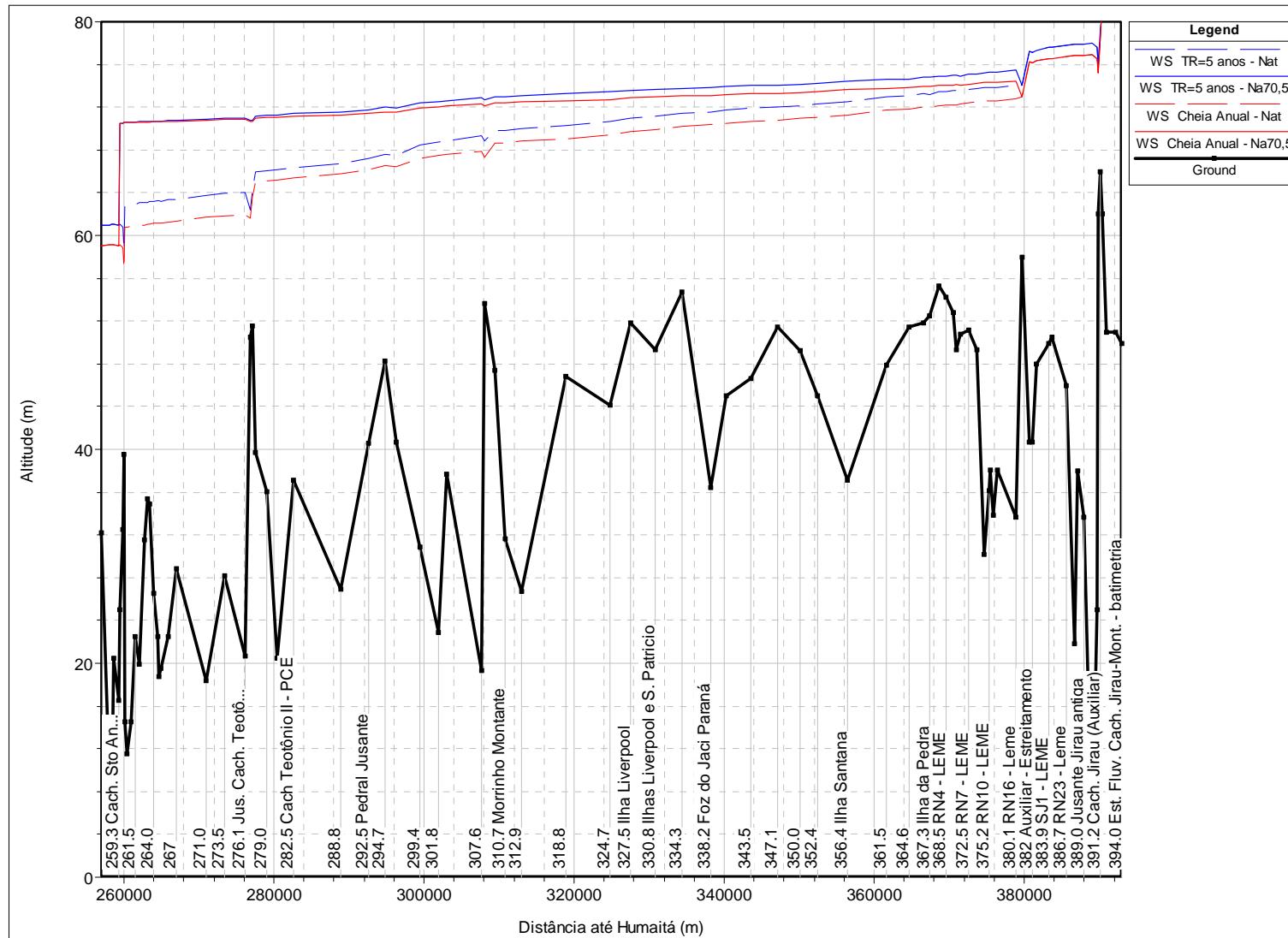
Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio

Figura 3.18.  
Perfis de Linha d'Água em Condições Naturais e com Reservatório (Q = 5000 m<sup>3</sup>/s e QMLT) – NA = 70,5 m



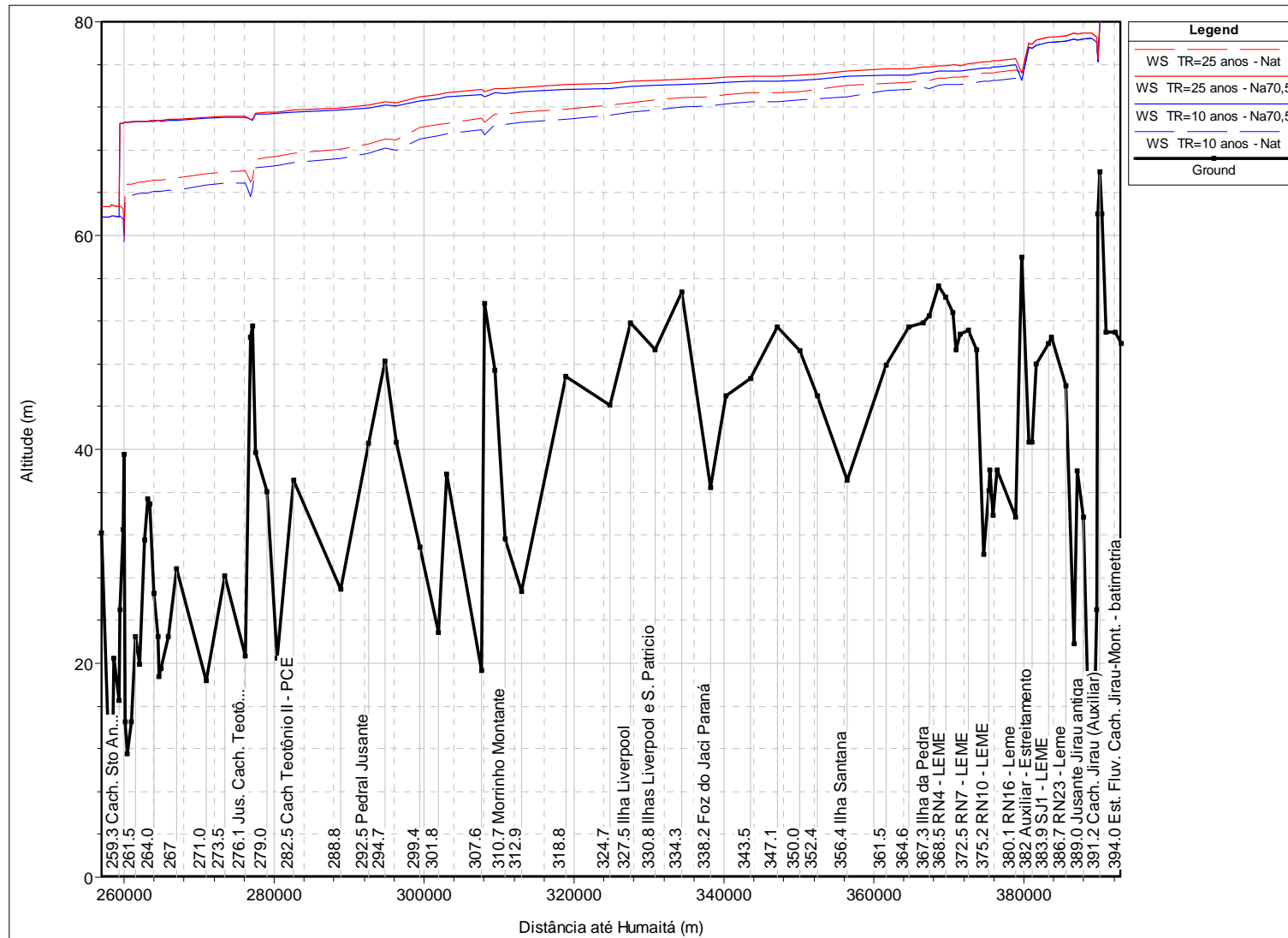
Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio

Figura 3.19.  
Perfis de Linha d'Água em Condições Naturais e com Reservatório (Cheia anual e TR = 5 anos) – NA = 70,5 m



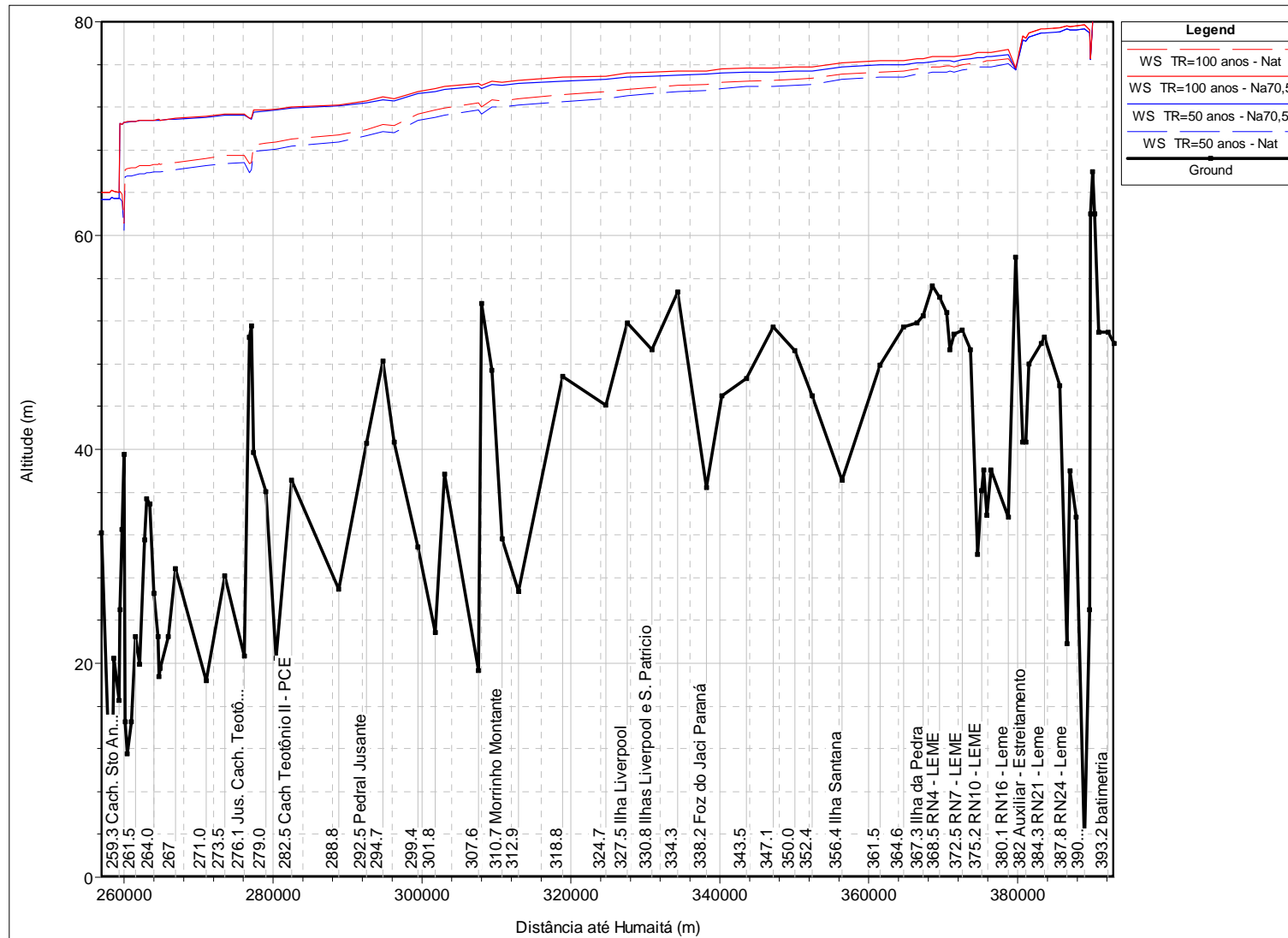
Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio

Figura 3.20.  
Perfis de Linha d'Água em Condições Naturais e com Reservatório (TR = 10 anos e TR = 25 anos) – NA = 70,5 m



Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio

Figura 3.21.  
Perfis de Linha d'Água em Condições Naturais e com Reservatório (TR = 50 anos e TR = 100 anos) – NA = 70,5 m



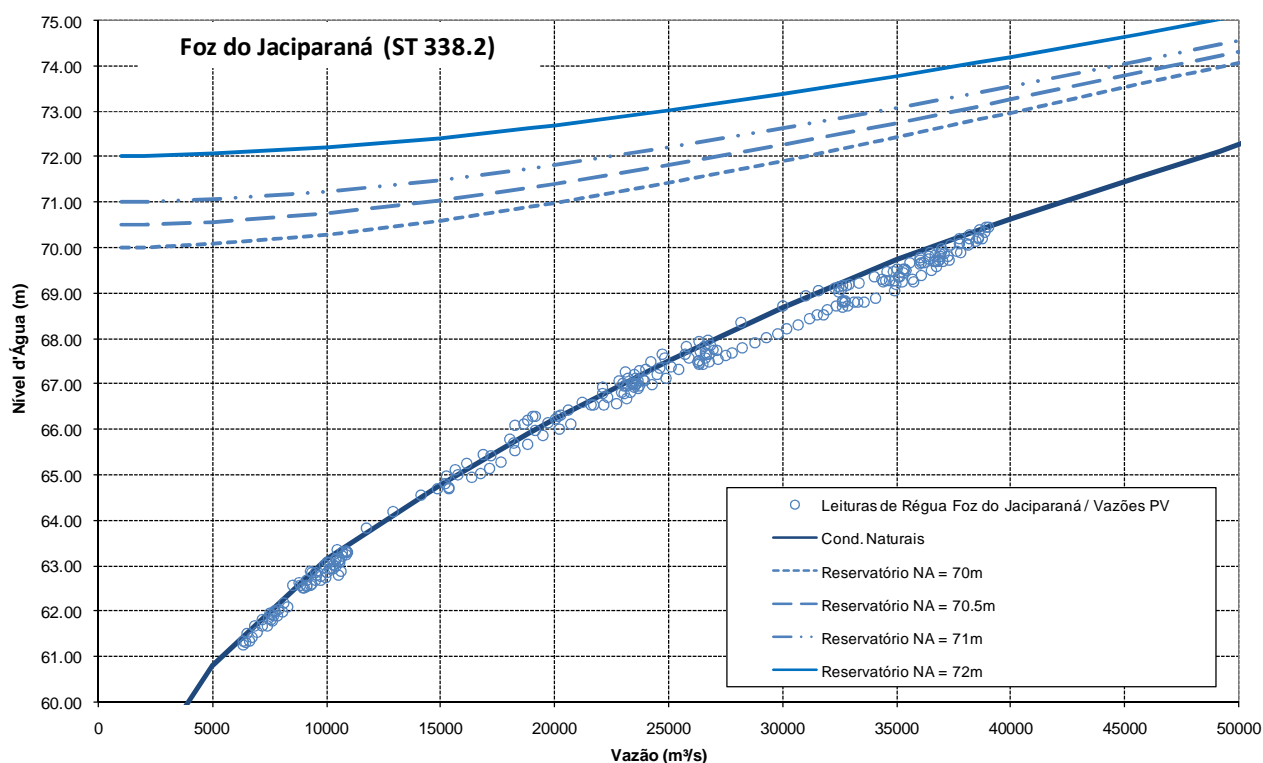
### 3.6. Curvas Chave com Influência de Remanso nos Locais de Interesse.

Os resultados obtidos, expressos através de perfis de linha d'água apresentados em forma tabular e gráfica, permitem uma completa caracterização do regime de escoamento ao longo do futuro reservatório.

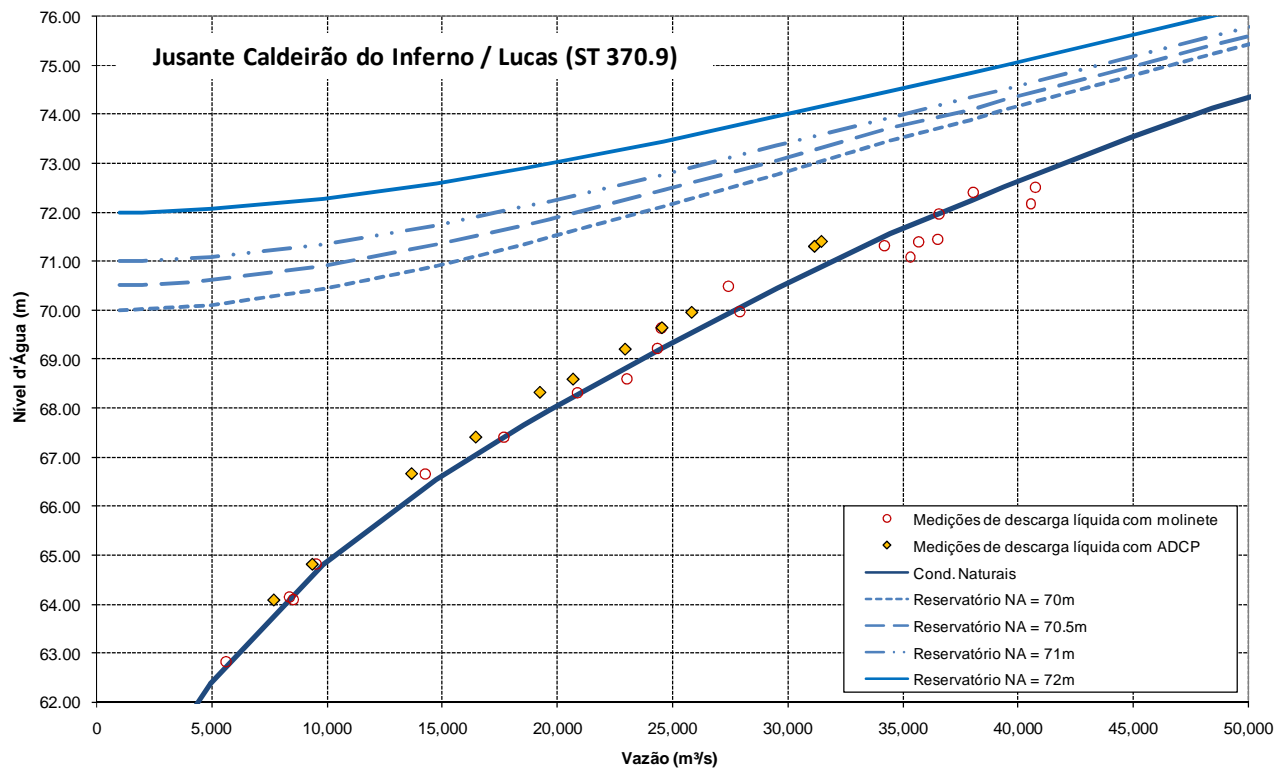
Quatro seções ao longo do reservatório foram destacadas em função de sua importância em relação ao estabelecimento de níveis d'água para desapropriação, caso da seção Foz do Jaciparaná, e em relação à interface com o empreendimento de montante, a UHE Jirau, caso da seção Jusante Caldeirão do Inferno, seção Canal de Fuga da UHE Jirau e seção Jusante da Cachoeira de Jirau. Para estas seções foram desenvolvidas curvas-chave para as condições naturais e para as condições futuras.

As figuras a seguir (Figura 3.22 a Figura 3.25) apresentam as curvas ajustadas e diferentes situações de remanso consideradas.

**Figura 3.22.**  
**Curva-Chave do Rio Madeira na Seção Foz do Jaciparaná**



**Figura 3.23.**  
**Curva-Chave do Rio Madeira na Seção Cachoeira Caldeirão do Inferno Jusante**



**Figura 3.24.**  
**Curva-Chave do Rio Madeira na Seção Canal de Fuga da UHE Jirau**

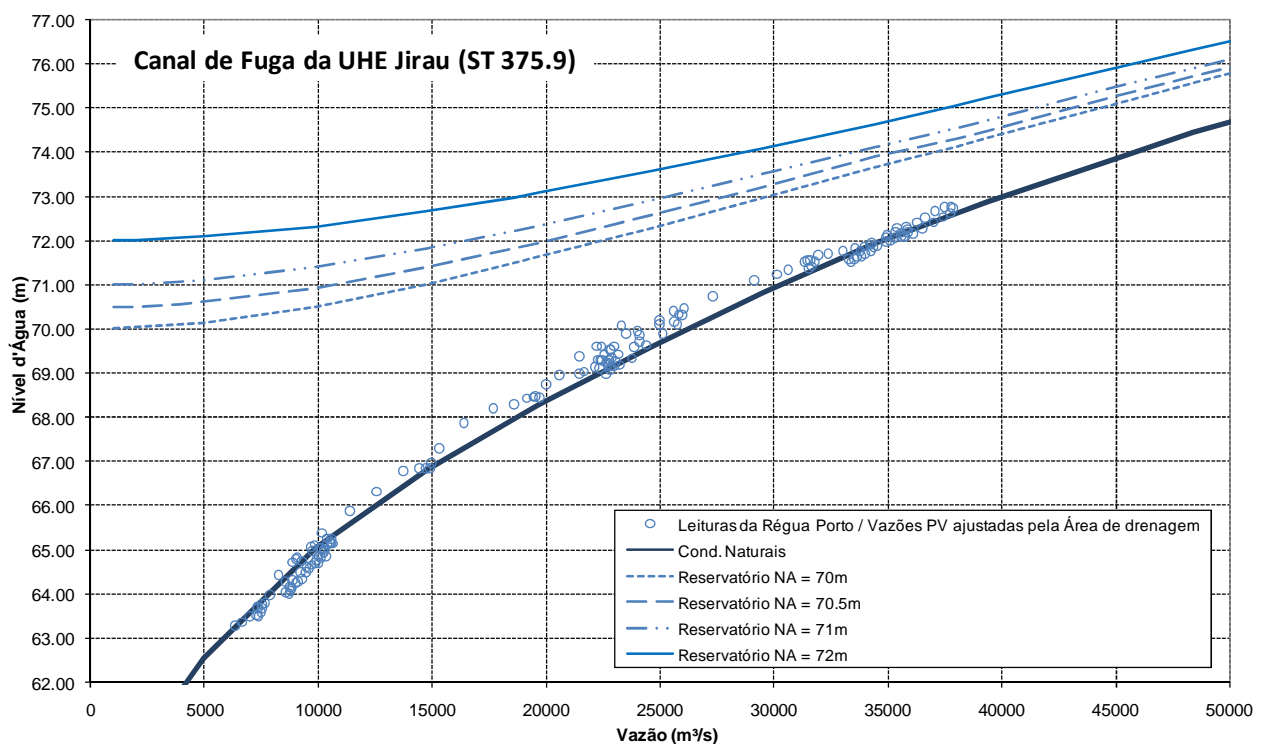
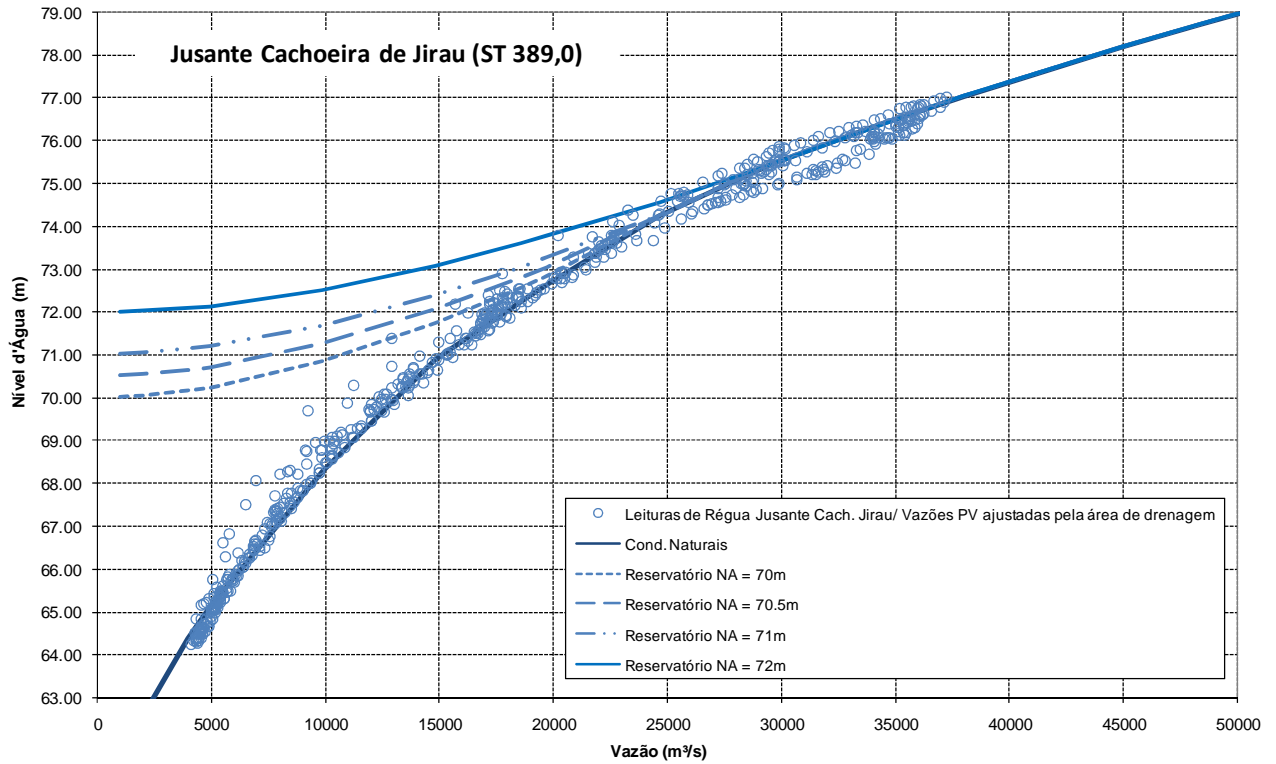




Figura 3.25.  
Curva-Chave do Rio Madeira na Seção Jusante Cachoeira de Jirau (eixo considerado nos estudos de viabilidade)



## **4. CONCLUSÕES**

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

Os estudos de remanso do reservatório da UHE Santo Antonio foram realizados com base em levantamento exaustivo de seções topobatimétricas, leituras de régua limnimétricas e medições de descargas. A base de dados empregada permitiu o estabelecimento de um modelo confiável, comprovado através de um processo de validação, para prognosticar os níveis d'água ao longo do futuro reservatório, para diversas condições hidrológicas.

Os resultados obtidos, expressos através de perfis de linha d'água apresentados em forma tabular e gráfica, permitem uma completa caracterização do regime de escoamento ao longo dos futuros reservatórios.

Quatro seções ao longo dos reservatórios foram destacadas em função de sua importância:

- Foz do Jaciparaná, em relação ao estabelecimento de níveis d'água para desapropriação;
- Jusante Cachoeira do Inferno em relação à interface entre os empreendimentos;
- Canal de Fuga da UHE Jirau (Régua Porto) em relação à interface entre os empreendimentos;
- Jusante Cachoeira Jirau (canal de fuga da Viabilidade) em relação a situação antes da mudança do eixo da UHE Jirau.

Para estas seções foram desenvolvidas curvas-chave para as condições naturais e para as condições futuras, tendo sido ajustadas expressões analíticas para o cálculo dos níveis d'água em função das vazões em trânsito.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

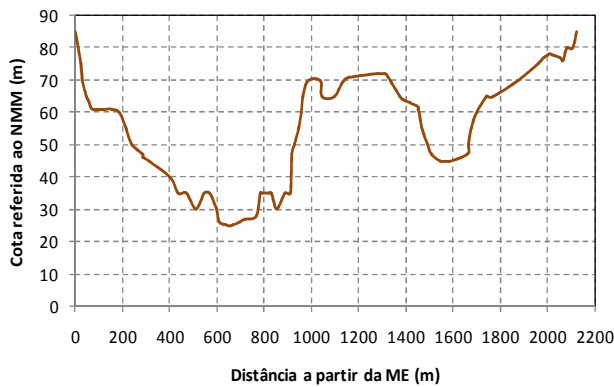
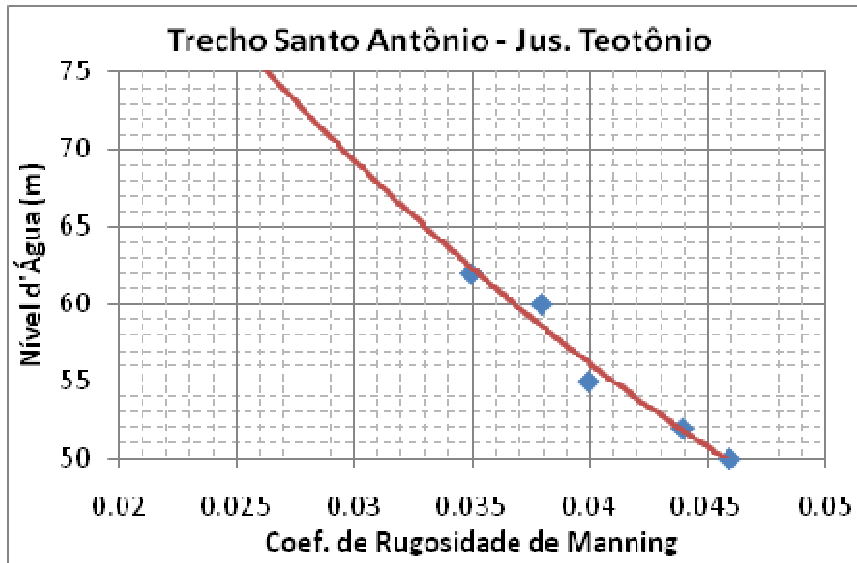
**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

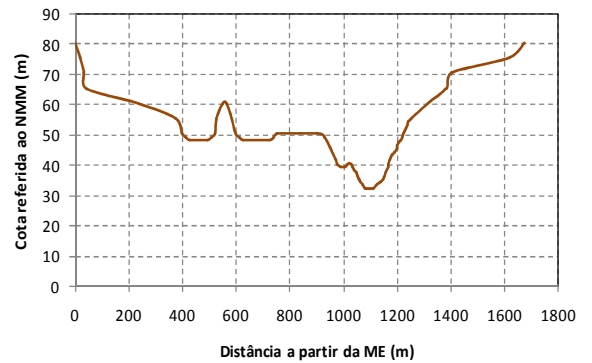
1. ODEBRECHT/FURNAS/PCE - Estudos de Inventário Hidrelétrico da Bacia do Rio Madeira - Rio de Janeiro, 2005
2. ODEBRECHT/FURNAS/PCE - Estudos de Viabilidade do Aproveitamento Hidrelétrico de Santo Antonio. Rio de Janeiro, 2006.
3. MESA/PCE – Projeto Básico do Aproveitamento Hidrelétrico de Santo Antonio. Rio de Janeiro, 2008
4. MESA/PCE. Relatório Parcial - PJ0697-X-H41-GR-ED-102-0A. Junho de 2008.
5. MESA/PCE. Relatório de Instalação e Operação de Estações Fluviométricas no Rio Madeira no Sítio da UHE Santo Antônio – Setembro a Dezembro de 2008 - PJ0697-X-H41-GR-RL-002-1A. Março de 2009.
6. USACE (US ARMY CORPS OF ENGINEERS), HYDROLOGICAL ENGINEERING CENTER, 2008a. “HEC-RAS River Analysis System – User’s Guide”, Versão 4.0.
7. USACE (US ARMY CORPS OF ENGINEERS), HYDROLOGICAL ENGINEERING CENTER, 2008b. “HEC-RAS River Analysis System – Hydraulic Reference Manual”, Versão 4.0.
8. STRASSER, M. A.; RIBEIRO NETO, A.; SILVA, R. C. V.; MASCARENHAS, F. C. B. Estudo da Variação do Coeficiente de Rugosidade de Manning em Rios da Bacia Amazônica por Meio de Modelagem Hidrodinâmica. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa/PB. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005. v. 1.
9. CHOW, Ven Te. Open Channel Hydraulics. Tokyo, Mc Graw-Hill, 1959.

## **6. ANEXO I – SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS UTILIZADAS NO PROCESSO DE MODELAGEM**

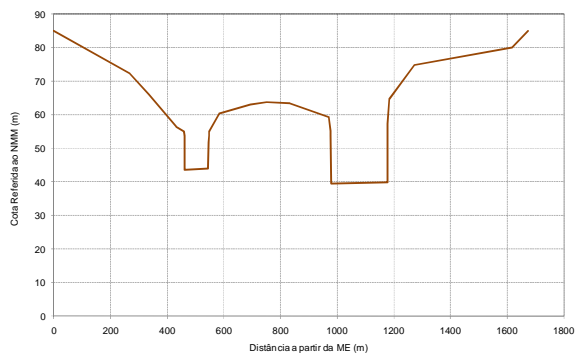
Trecho Santo Antônio – Jusante Cachoeira de Teotônio  
(ST 260,0 – ST 276,1)



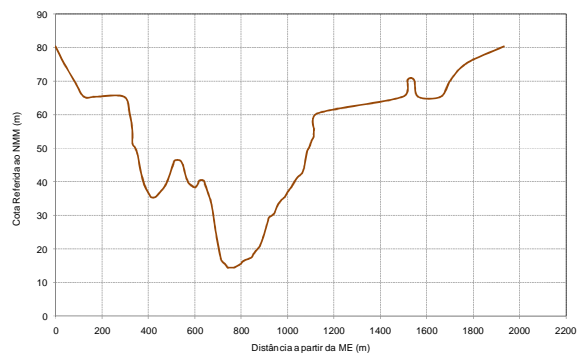
ST 259.5



ST 259.8

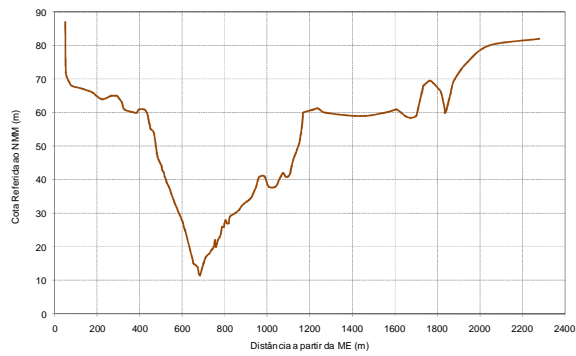


ST 260.0

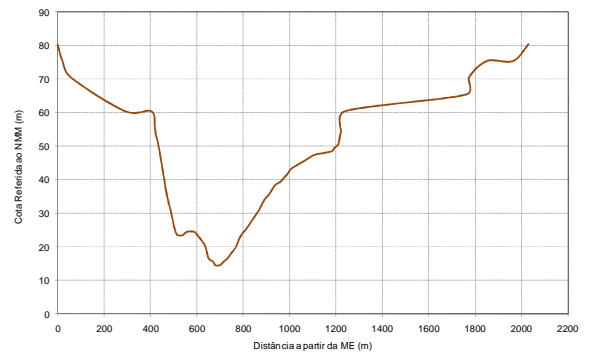


ST 260.2

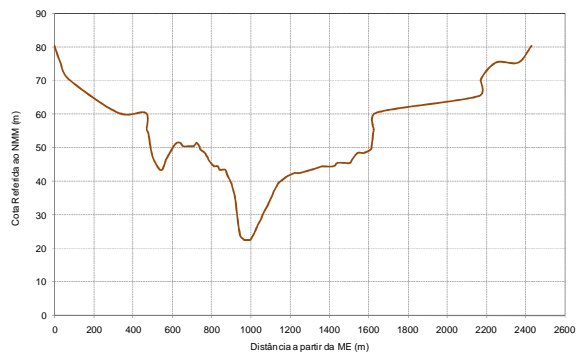
**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**



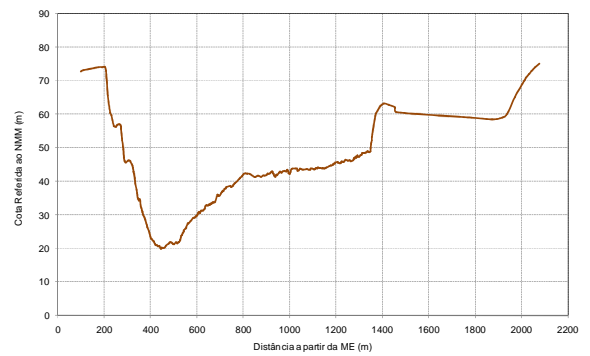
**ST 260,5**



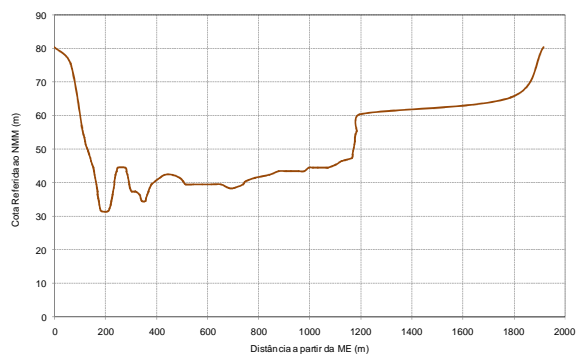
**ST 261,0**



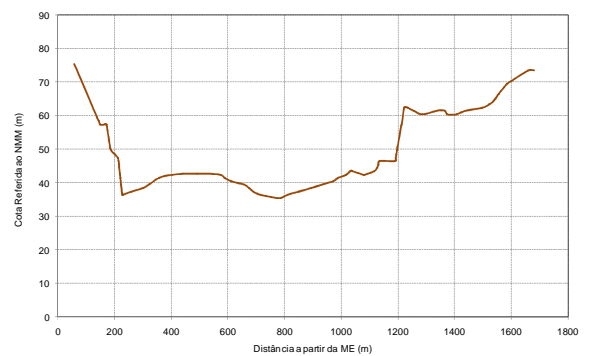
**ST 261,5**



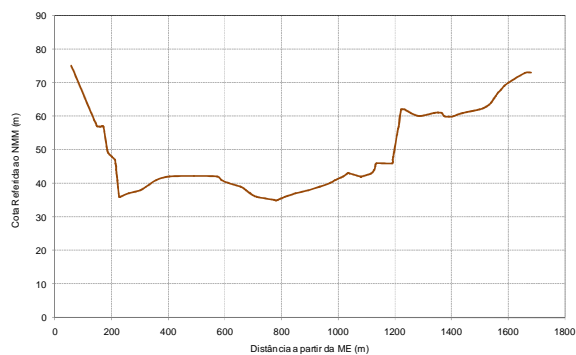
**ST 262,1**



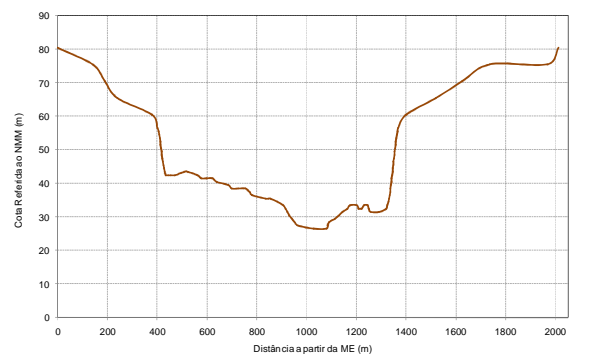
**ST 262,7**



**ST 263,1**



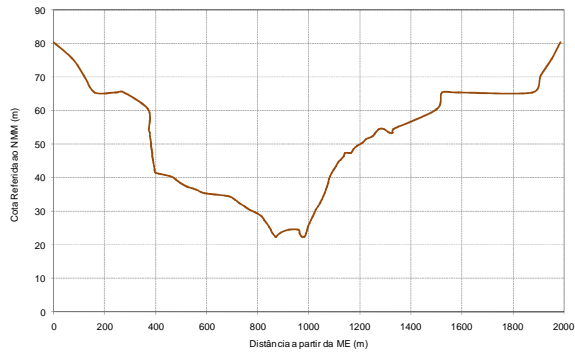
**ST 263,4**



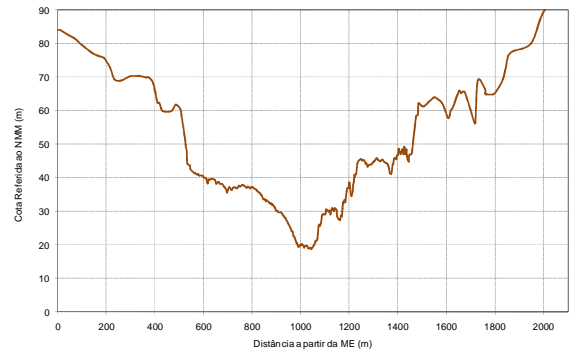
**ST 264,0**



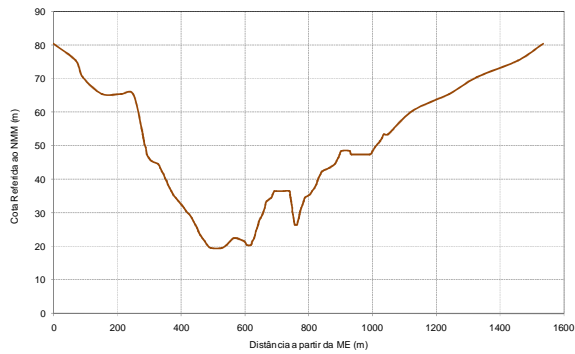
**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**



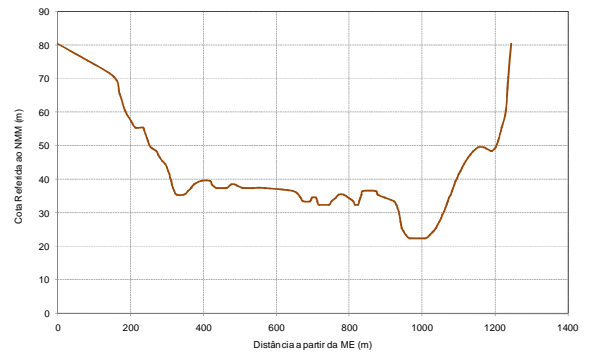
**ST 264,5**



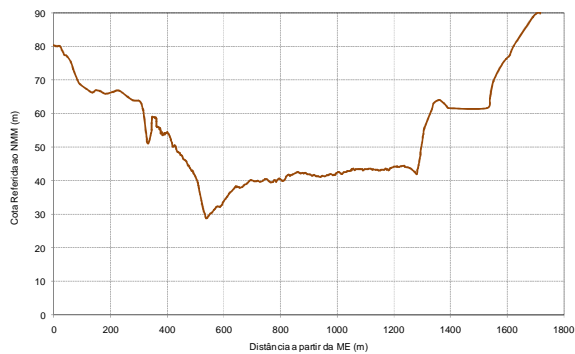
**ST 264,7**



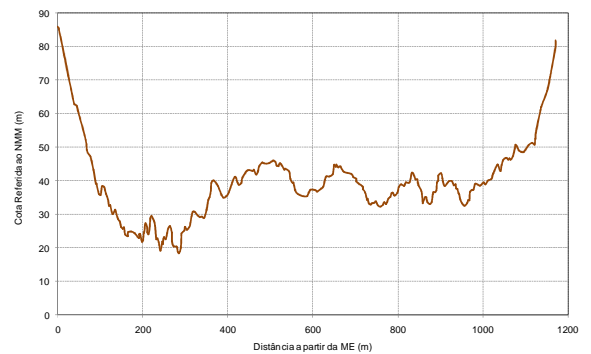
**ST 264,9**



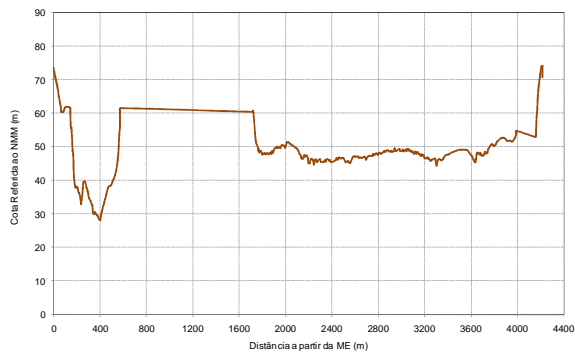
**ST 265,9**



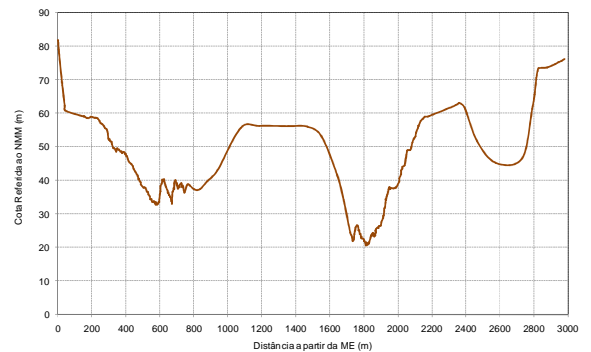
**ST 267,0**



**ST 271,0**

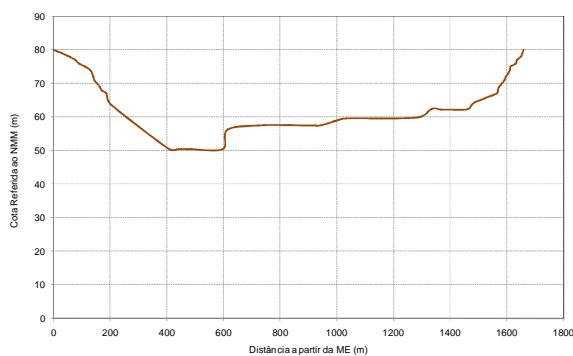
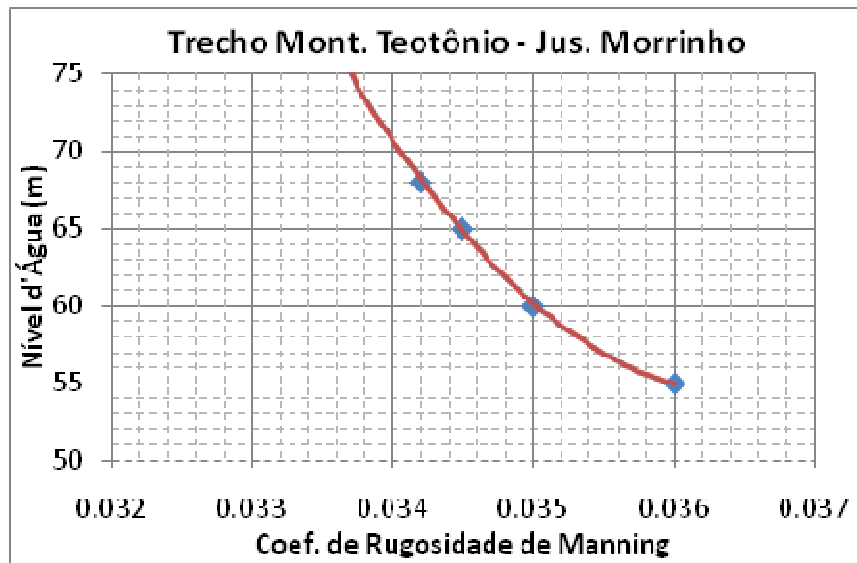


**ST 273,5**

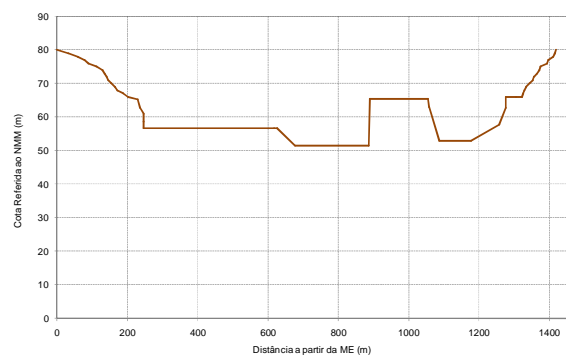


**ST 276,1**

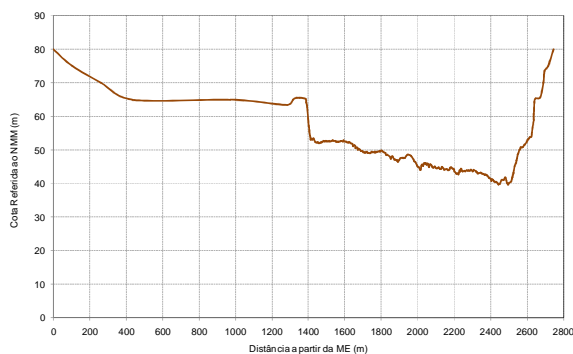
Trecho Montante Cachoeira de Teotônio – Jusante Cachoeira de Morrinhos  
(ST 276,8 – ST 307,6)



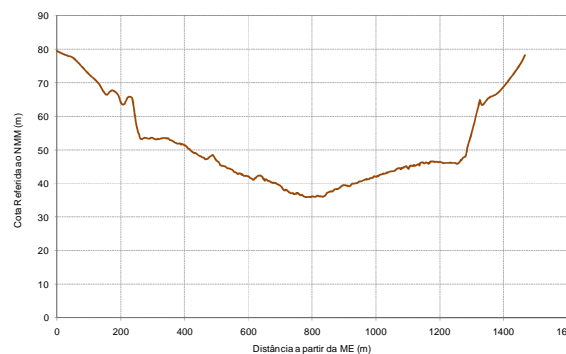
ST 276,8



ST 277,0

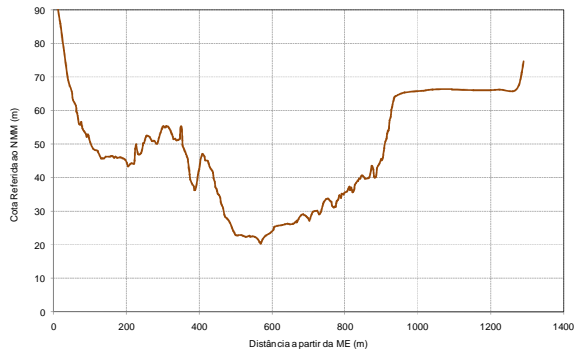


ST 277,4

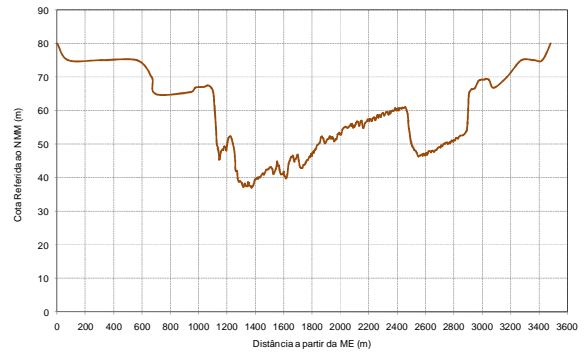


ST 279,0

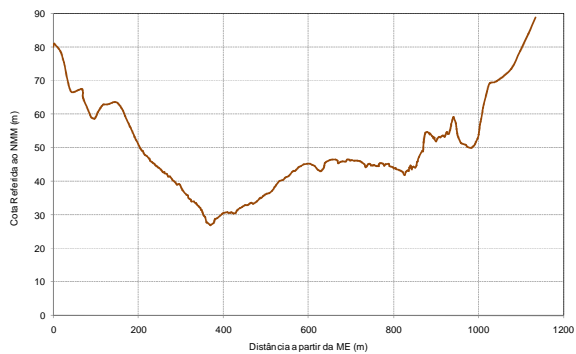
**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**



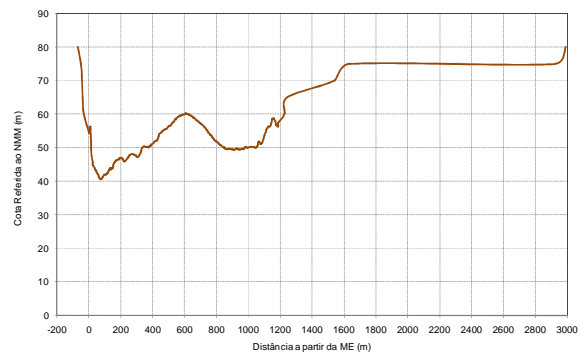
**ST 280,4**



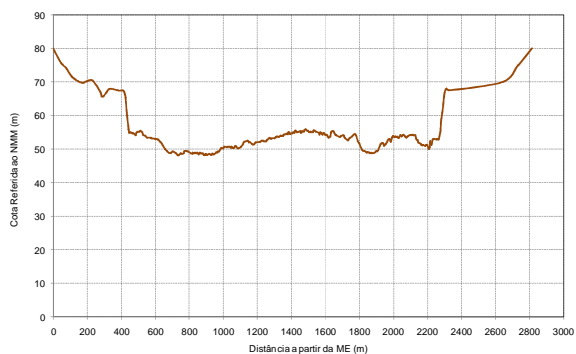
**ST 282,5**



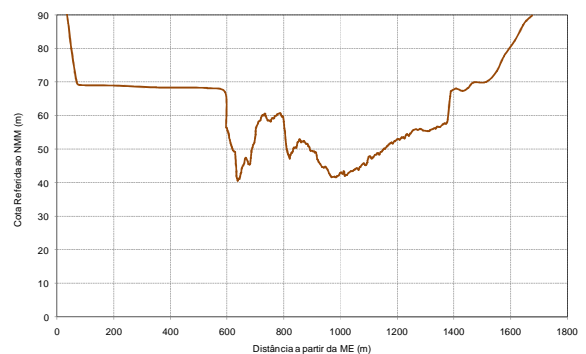
**ST 288,8**



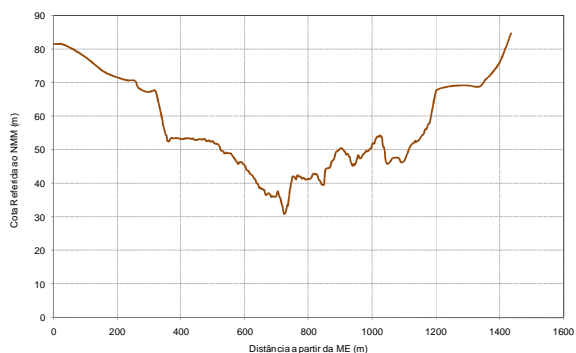
**ST 292,5**



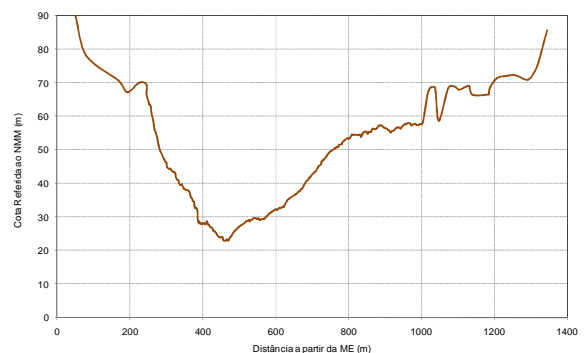
**ST 294,7**



**ST 296,2**

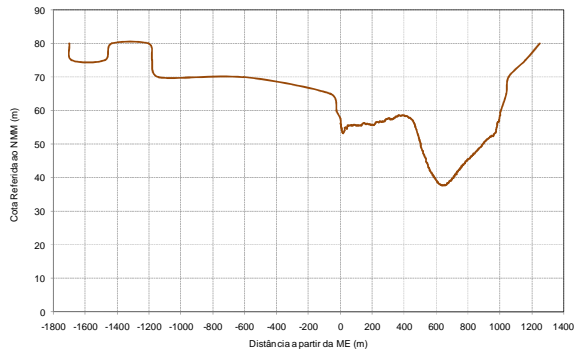


**ST 299,4**

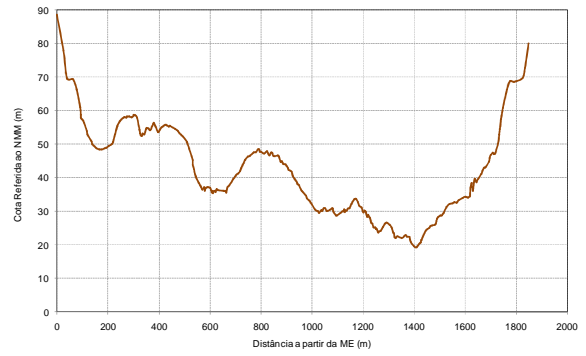


**ST 301,8**

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

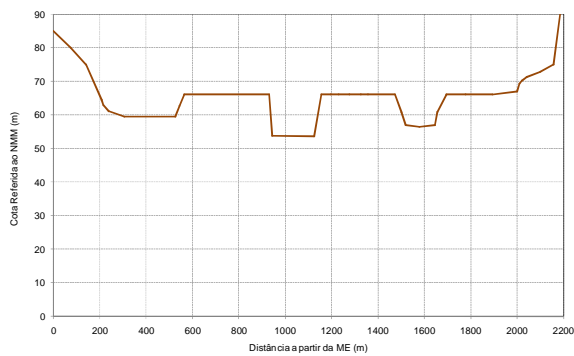
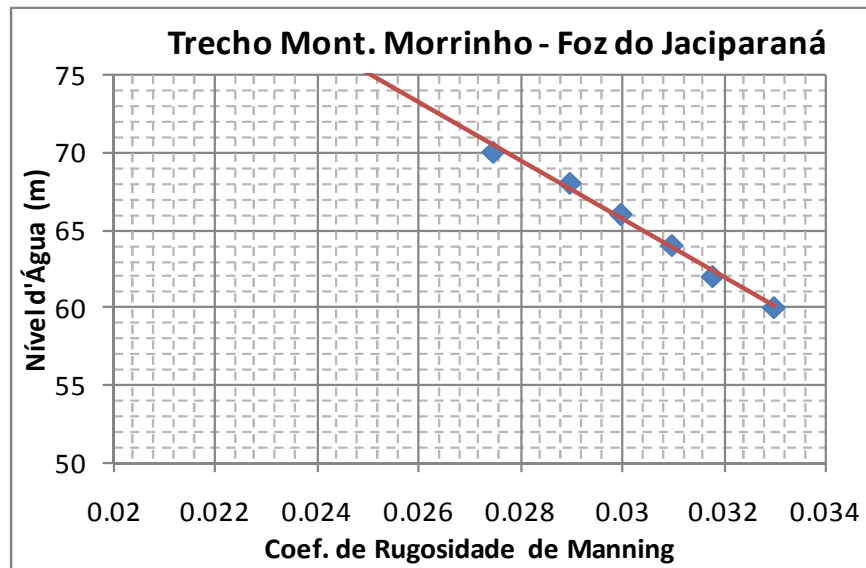


**ST 303,0**

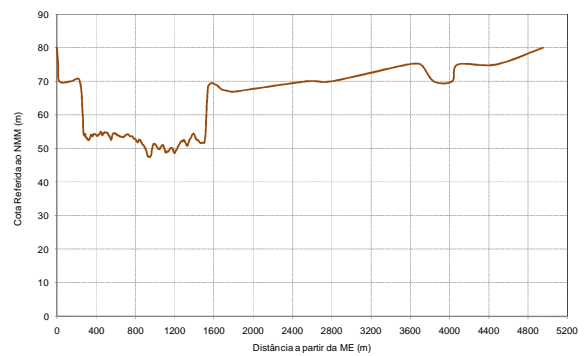


**ST 307,6**

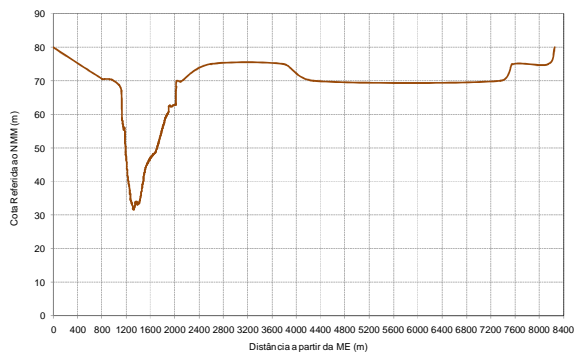
Trecho Montante Cachoeira de Morrinhos – Foz do Jaciparaná  
(ST 308,0 – ST 334,3)



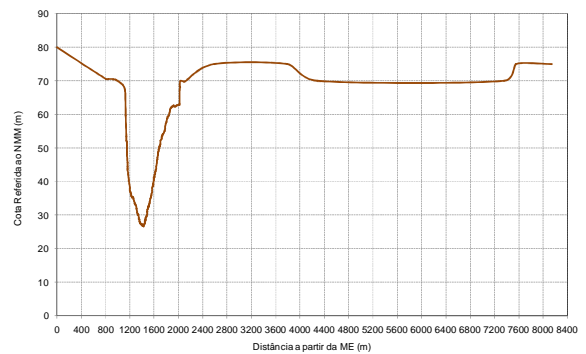
**ST 308,0**



**ST 309,4**

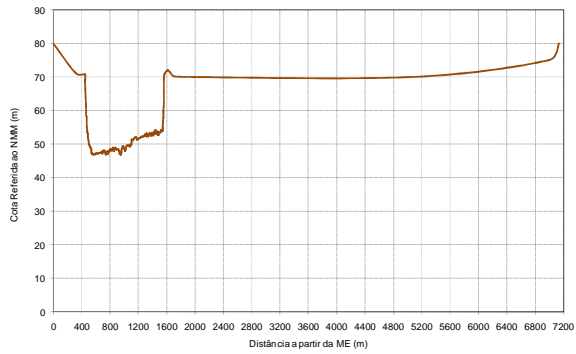


**ST 310,7**

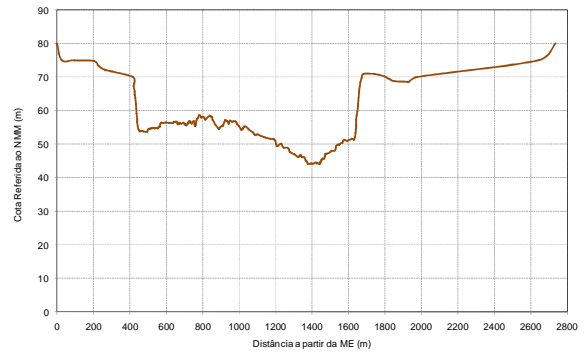


**ST 312,9**

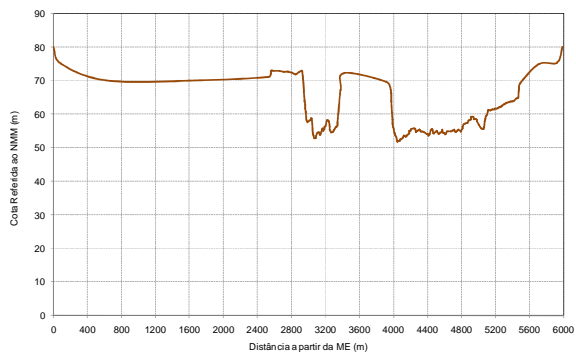
**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**



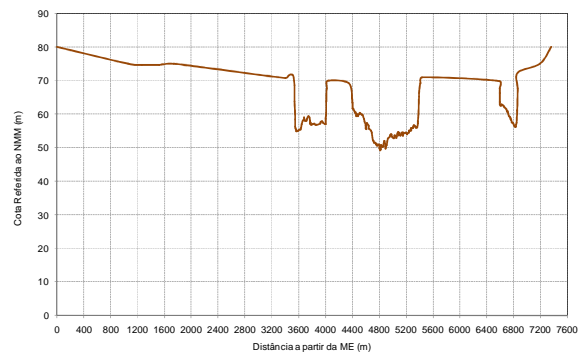
**ST 318,8**



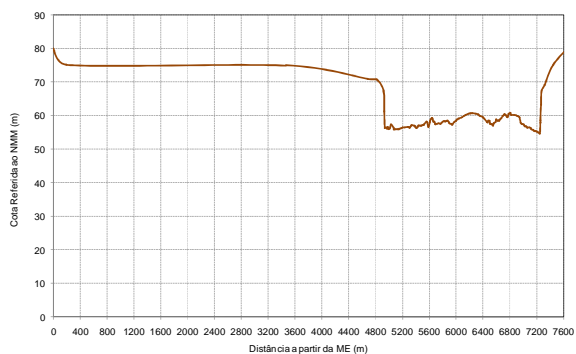
**ST 324,7**



**ST 327,5**

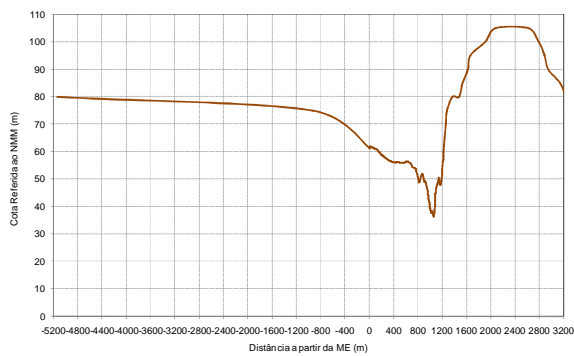
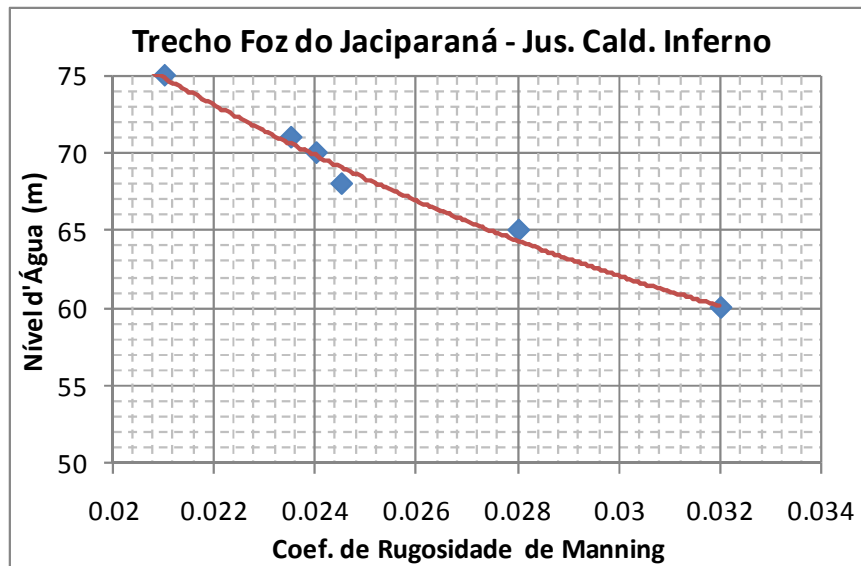


**ST 330,8**

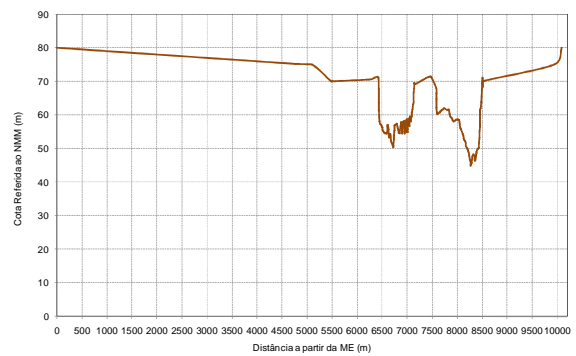


**ST 334,3**

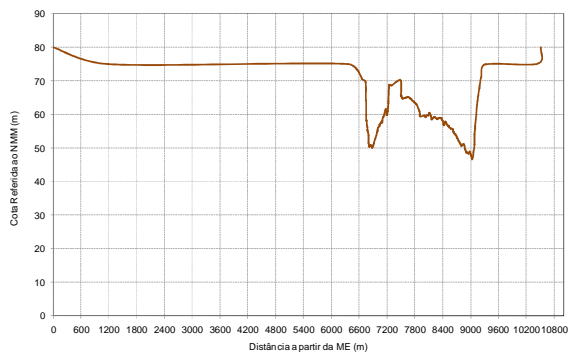
Trecho Foz do Jaciparaná – Jusante Caldeirão do Inferno  
(ST 338,2 – ST 370,9)



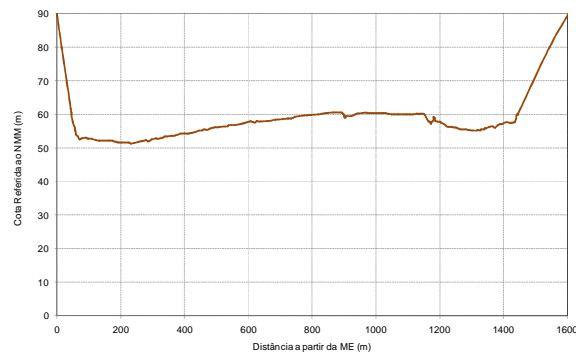
ST 338,2



ST 340,2

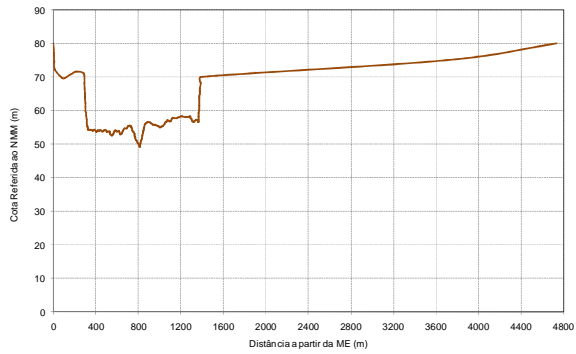


ST 343,5

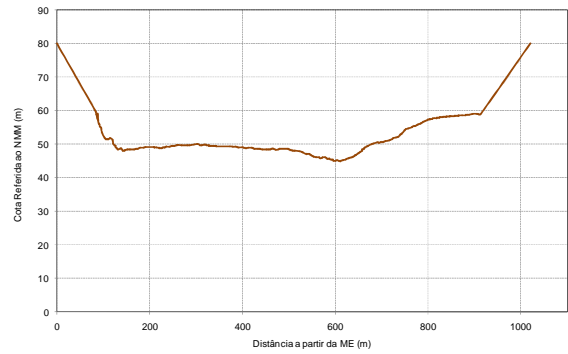


ST 347,1

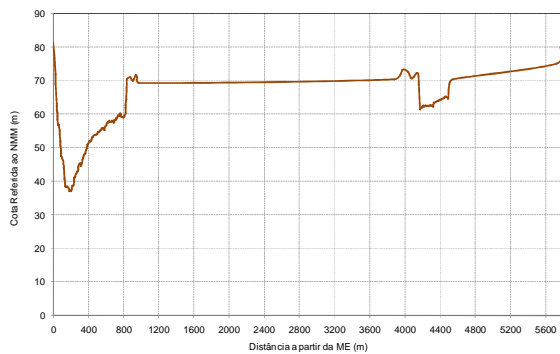
**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**



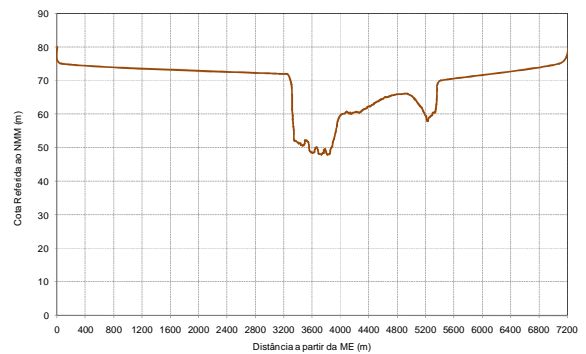
**ST 350,0**



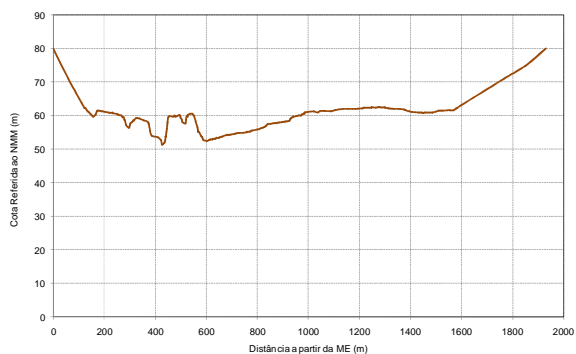
**ST 352,4**



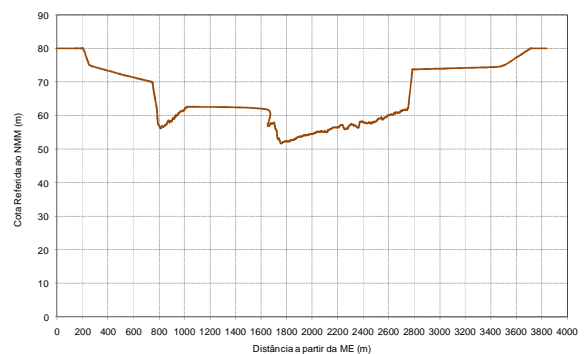
**ST 356,4**



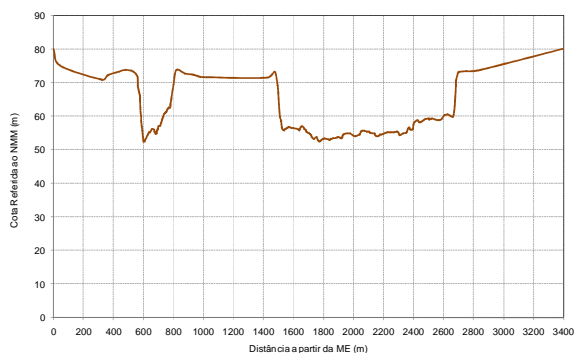
**ST 361,5**



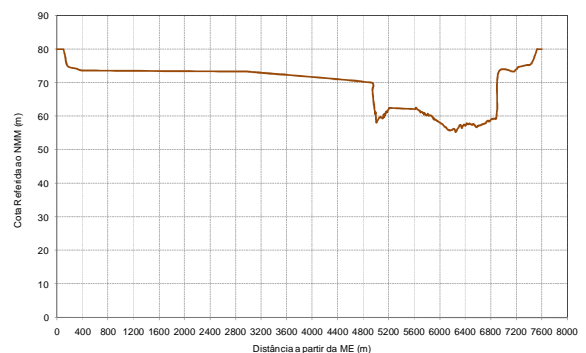
**ST 364,6**



**ST 366,5**



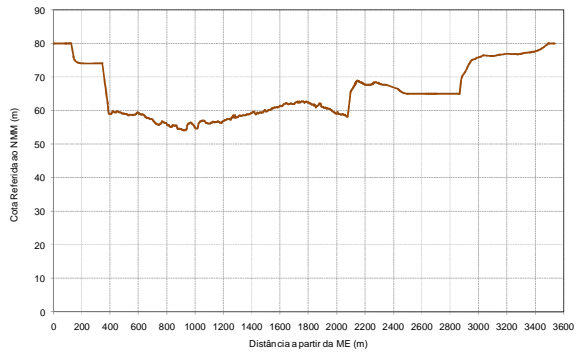
**ST 367,3**



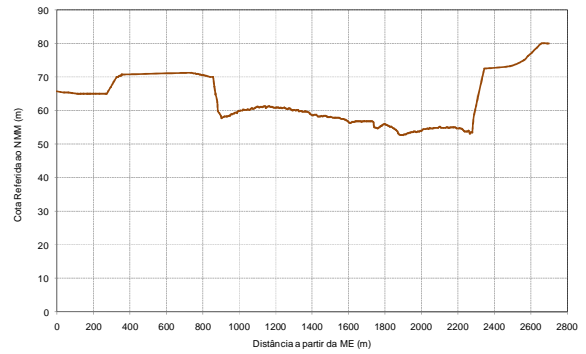
**ST 367,5**



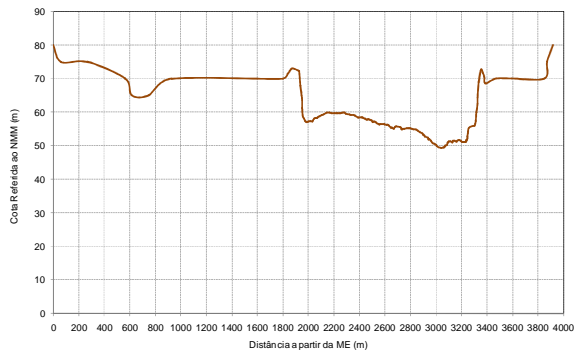
**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**



**ST 368,5**

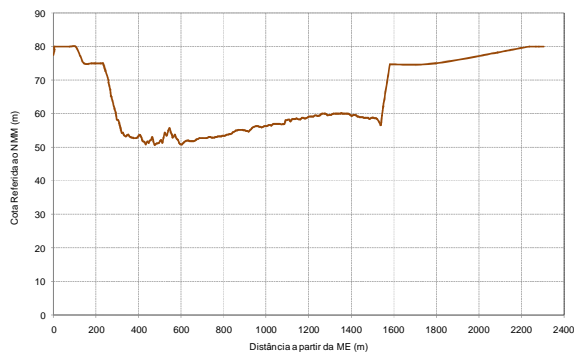
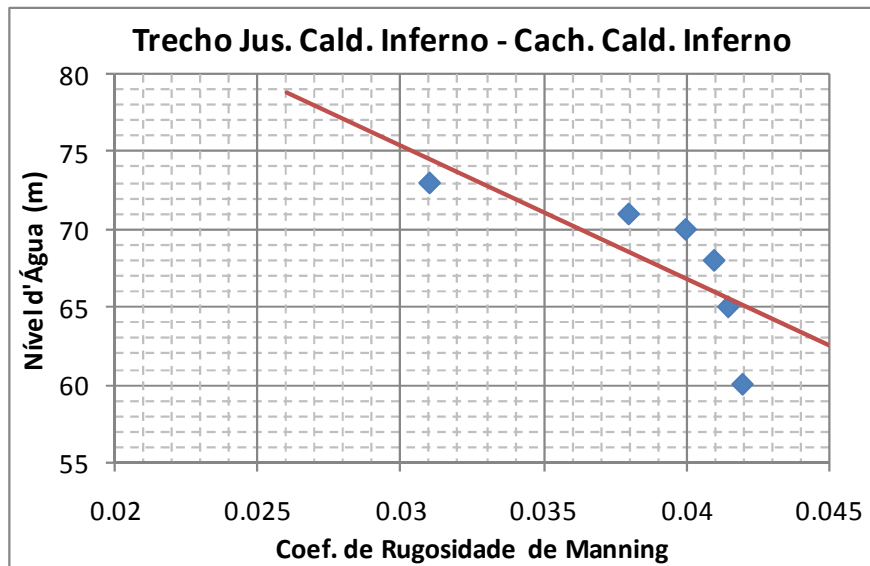


**ST 370,5**

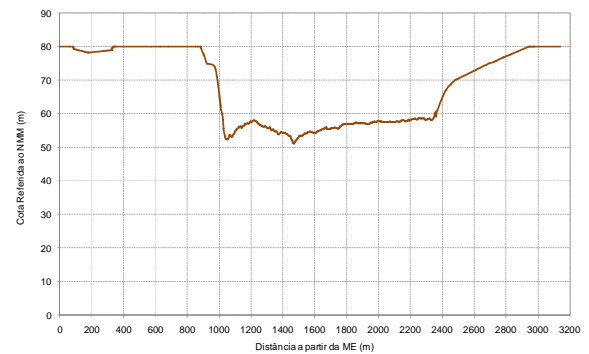


**ST 370,9**

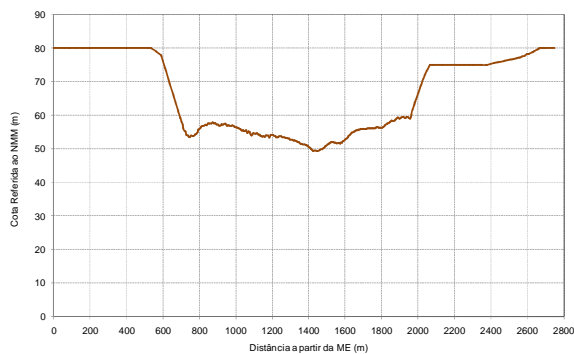
Trecho Jusante Caldeirão do Inferno – Cachoeira Caldeirão do Inferno  
(ST 371,5 – ST 380,8)



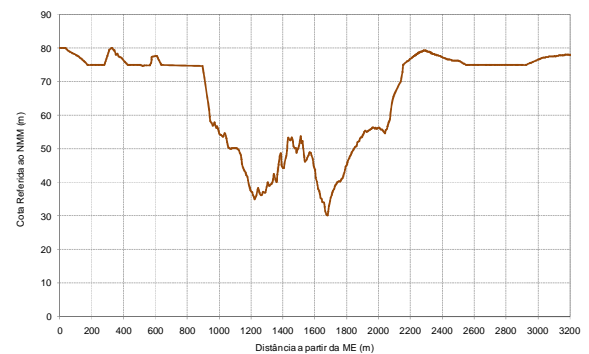
ST 371,5



ST 372,5

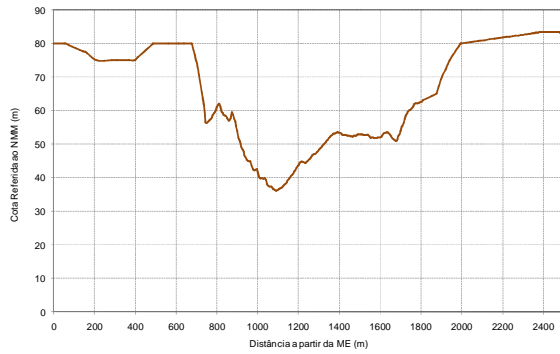


ST 373,5

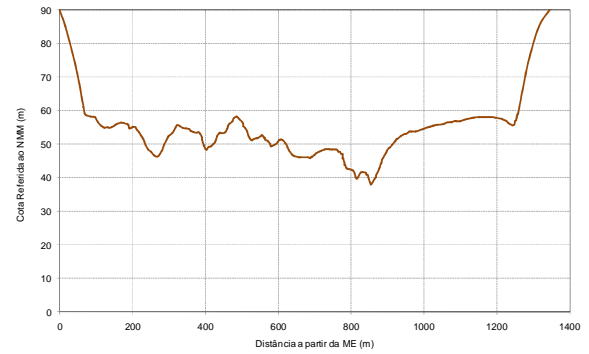


ST 374,5

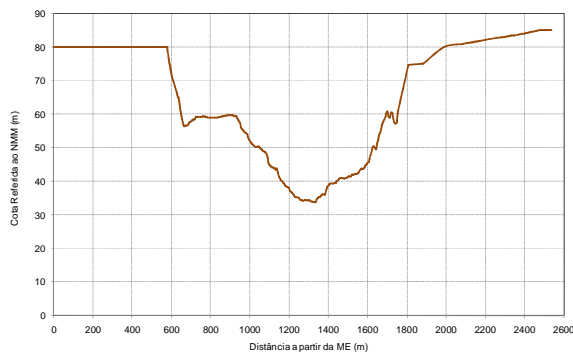
**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**



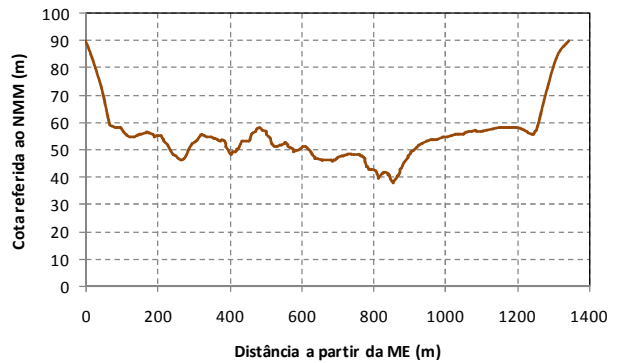
**ST 375,2**



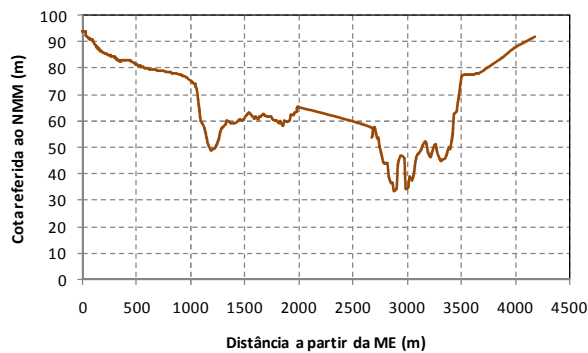
**ST 375,5**



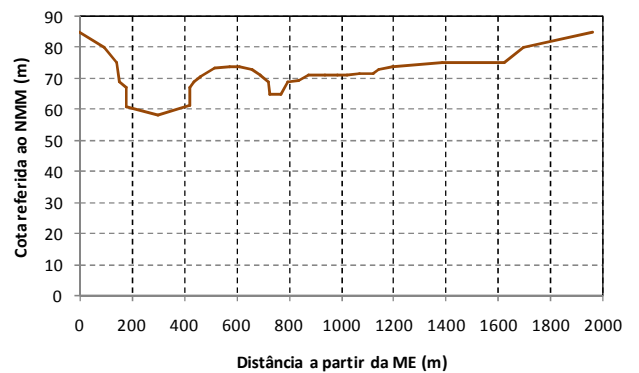
**ST 375,9**



**ST 376.5**

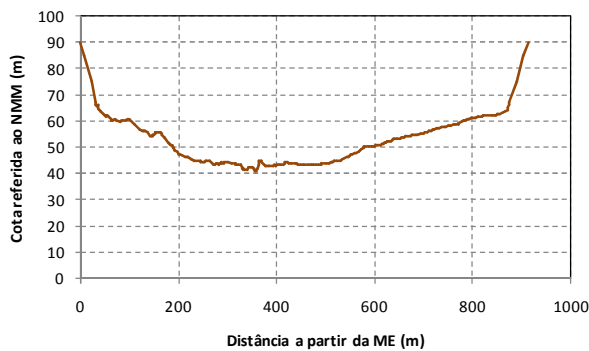
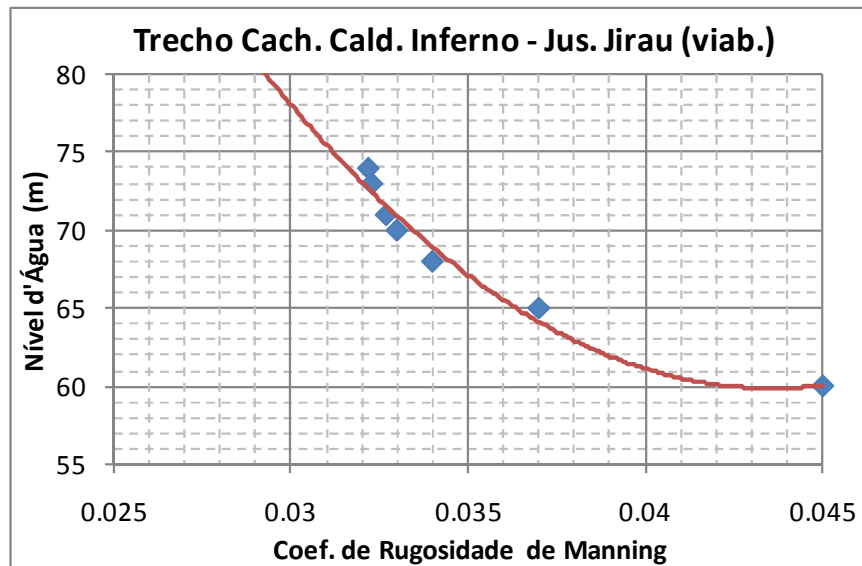


**ST 380,1**

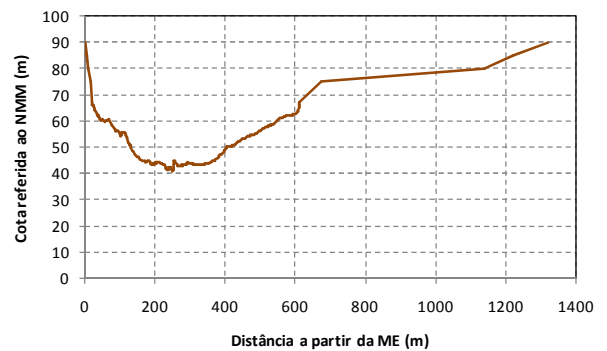


**ST 380,8**

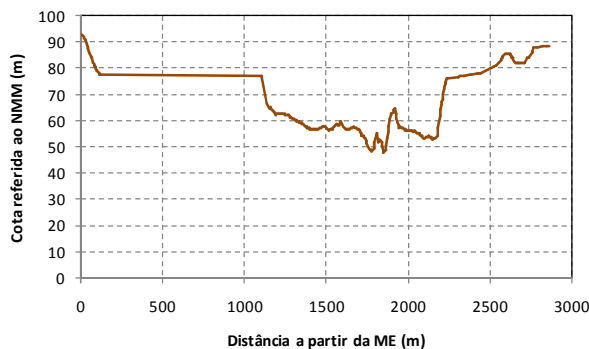
Trecho Cachoeira do Inferno – Jusante Cachoeira de Jirau (viabilidade)  
(ST 381,7 – ST 389,0)



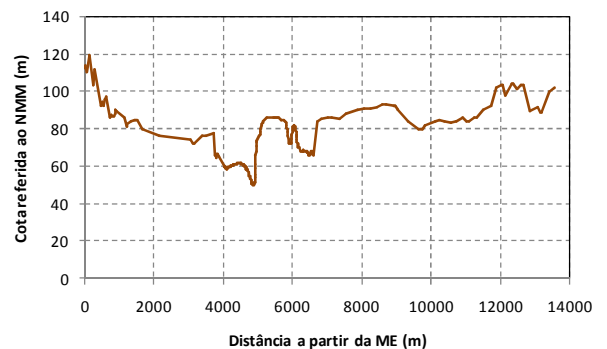
ST 381,7



ST 382,0

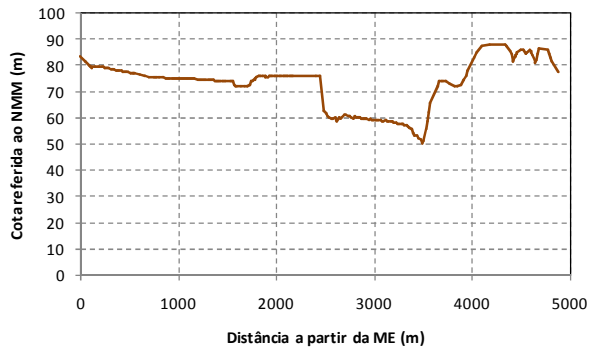


ST 382,2

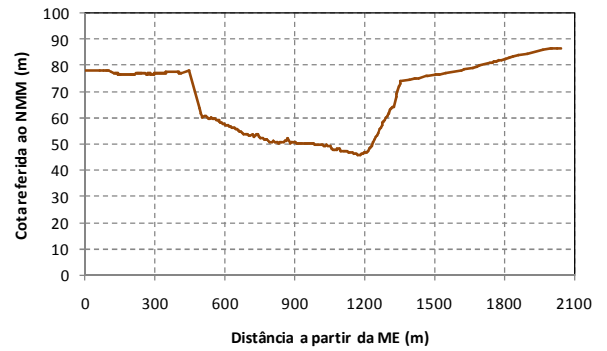


ST 383,9

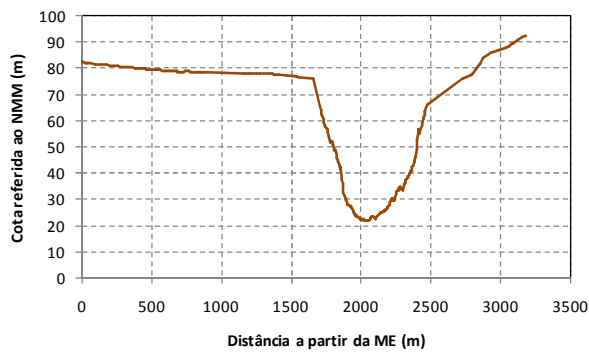
**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**



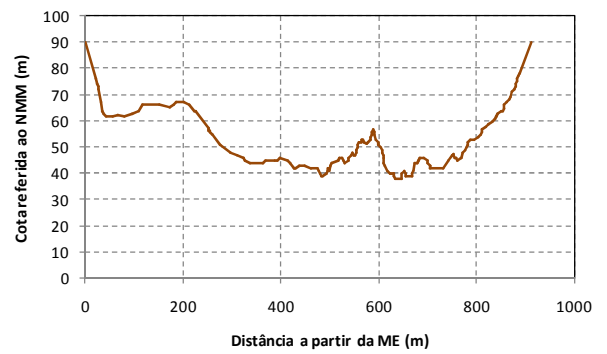
**ST 384,3**



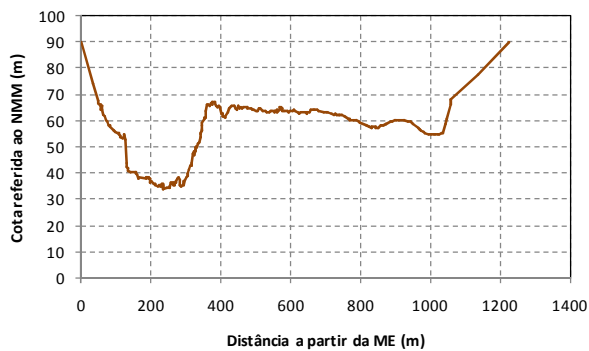
**ST 386,7**



**ST 387,8**



**ST 388,2**



**ST 389,0**

## **7. ANEXO II – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS NO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO**