

UHE SANTO ANTÔNIO



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

RELATÓRIO DE ANDAMENTO – RA 06

PJ0696-Z-H41-GR-RL-104-0A

JULHO/2009

UHE SANTO ANTÔNIO

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

RELATÓRIO DE ANDAMENTO – RA 06

PJ0696-Z-H41-GR-RL-104-0A

JULHO/2009

0	29/07/2009	EMISSÃO INICIAL	MAS/FBM	EFM	JCS
REV.	DATA	DESCRIÇÃO	ELAB.	VISTO	APROV.

ÍNDICE

<i>Item</i>	<i>Assunto</i>	<i>Página</i>
1.	INTRODUÇÃO	03
2.	ANDAMENTO DOS SERVIÇOS	06
2.1.	MODELO UNIDIMENSIONAL NO TRECHO DO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO	07
2.2.	MODELO UNIDIMENSIONAL NO TRECHO DE JUSANTE	09
2.2.1.	<u>Descrição do Modelo GSTARS 3.0</u>	09
2.2.2.	<u>Preparação dos Dados de Entrada do Modelo GSTARS</u>	11
2.2.3.	<u>Resultados Preliminares</u>	14
2.2.4.	<u>Próximas Atividades Relacionadas ao Processo de Modelagem</u>	16
2.3.	MODELO BIDIMENSIONAL NO TRECHO JUNTO À BARRAGEM	17
2.3.1.	<u>Seleção e Aquisição dos Modelos</u>	17
2.3.2.	<u>Geração Inicial da Malha do Modelo de Jusante</u>	17

1. INTRODUÇÃO

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

Conforme citado no Programa de Levantamentos e Monitoramento Hidrossedimentológico do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio, parte integrante do Projeto Básico Ambiental, a ampliação da base de dados hidrossedimentológicos obtida com a continuidade das campanhas hidrométricas realizadas após o EVTE e o EIA, determina uma revisão ampla dos Estudos Hidrossedimentológicos então realizados. Esta revisão se aplica fundamentalmente sobre a determinação e estabelecimento da curva de descarga líquida e curva de descarga sólida, além da distribuição granulométrica dos sedimentos nas principais estações fluviométricas do trecho em estudo.

Dessa forma, a nova análise deverá conter, entre outros:

- Modelagem matemática uni-dimensional do transporte de sedimentos do rio Madeira em condições atuais e com reservatório através da aplicação do modelo HEC-6, incluindo o trecho a jusante do aproveitamento, avaliando a evolução temporal das condições de assoreamento do reservatório e de erosão a jusante;
- Modelagem matemática bi-dimensional do transporte de sedimento do rio Madeira que deverá se restringir às regiões próximas ao barramento da UHE Santo Antônio (5 km a montante e 9 km a jusante), onde as maiores profundidades e o alargamento proporcionado pela barragem, a montante, e os efeitos das estruturas de descargas, a jusante, têm influências significativas sobre o comportamento sedimentológico.

Esses estudos, propostos no relatório Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico do Rio Madeira e dos Futuros Reservatórios, de janeiro de 2008, têm por objetivos:

- Aprofundar o conhecimento sobre o comportamento sedimentológico do rio Madeira nas condições atuais, anteriores à construção do aproveitamento de Santo Antônio, considerando todas as informações disponíveis até o presente;
- Prognosticar a evolução do comportamento do rio Madeira ao longo de todo o estirão afetado pela implantação do reservatório, ampliando a base de dados disponível e empregando as melhores técnicas de modelagem existentes e compatíveis com essa base;
- Detalhar o prognóstico do comportamento hidrossedimentológico das porções do reservatório próximas à barragem da UHE Santo Antônio, com auxílio de modelos bidimensionais;
- Deixar implantada ferramenta de análise sedimentológica (modelo unidimensional) que permita o acompanhamento dos processos prognosticados, após a entrada em operação do aproveitamento.

Em julho de 2008, foi emitido o Relatório de Andamento – RA 1 - PJ0696-B-R00-ZZ-RL-001-0, com a descrição dos serviços de modelagem matemática do comportamento sedimentológico do rio Madeira e do futuro reservatório da UHE Santo Antônio realizados até então. Considerando que o Contrato de Prestação de Serviços para a realização desses trabalhos foi celebrado entre Santo Antônio Energia S.A. – SAESA e PCE – Projetos e Consultorias de Engenharia Ltda, em 15 de janeiro de 2009 e teve o início

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

efetivo dos trabalhos em 15 de fevereiro, o relatório RA 02, de março de 2009, apresentou o andamento dos serviços realizados no período de julho de 2008 a 15 de março de 2009. A partir de então, os demais Relatórios de Andamento vem sendo emitidos mensalmente, sempre contendo as atividades desenvolvidas entre os dias 16 do mês anterior e 15 do mês subsequente.

Este relatório, o RA 06, apresenta os serviços realizados no período de 16 de junho a 15 de julho de 2009.

2. ANDAMENTO DOS SERVIÇOS

A implantação final do modelo está em andamento em três frentes, uma para o trecho a jusante da barragem, uma para o trecho do reservatório e uma para o trecho a montante da barragem do AHE Jirau.

2.1 MODELO UNIDIMENSIONAL NO TRECHO DO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO

Modelo de Montante – A implementação definitiva do modelo para o trecho a montante de Jirau foi concluída com a implantação das seções topobatimétricas disponíveis entre a Ilha do Padre e a Cachoeira de Jirau, cobrindo assim o novo trecho que surgiu com o deslocamento da barragem de Jirau. Foi concluída também uma calibração preliminar do modelo hidráulico desse trecho, mas os parâmetros de rugosidade ficaram diferentes dos valores esperados em função da granulometria do material de fundo. Antes de passar à implantação do modelo de transporte de sedimento, está sendo feita uma revisão das seções topobatimétricas disponíveis e dos perfis simulados, visando melhor definir os controles localizados e, assim, obter coeficientes de rugosidade mais realistas.

Existe agora a possibilidade de se contar com seções topobatimétricas levantadas para pelo consórcio construtor da UHE Jirau. Caso essa situação se concretize, o modelo de montante poderá ser muito aprimorado em relação ao atualmente disponível. Diante dessa possibilidade, e considerando o grande afluxo de dados recebidos nesse último mês, com a conclusão dos levantamentos batimétricos, as atividades ligadas ao modelo de montante sofreram uma pausa, até que se tenha uma decisão sobre as novas seções a montante de Jirau.

Modelo do Reservatório de Santo Antonio – Concluídos os levantamentos topobatimétricos de seções do rio Madeira, foi possível iniciar os trabalhos de modelagem do trecho do rio Madeira correspondente ao reservatório de Santo Antônio.

A modelagem definitiva desse trecho dependia do levantamento de diversas seções topobatimétricas, atividade recentemente concluída. O modelo disponível da fase anterior dos estudos apresentava algumas deficiências em reproduzir os níveis d'água nas imediações da foz do Jaci Paraná e em algumas passagens de corredeiras. As novas levantadas proporcionaram condições bem favoráveis para o estabelecimento de um modelo que representasse essas passagens de forma mais convincente.

As Figuras apresentadas a seguir ilustram a qualidade da calibração do modelo hidráulico nesse trecho, considerando quatro situações hidrológicas. O limite de jusante do modelo é a seção da Régua R-5, a montante da cachoeira de Santo Antônio. Para montante, o modelo segue até o posto fluviométrico Jirau-Jusante.

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

Figura 2.1.
Perfil de Estiagem (05-09-2005) – Q = 2.641 m³/s

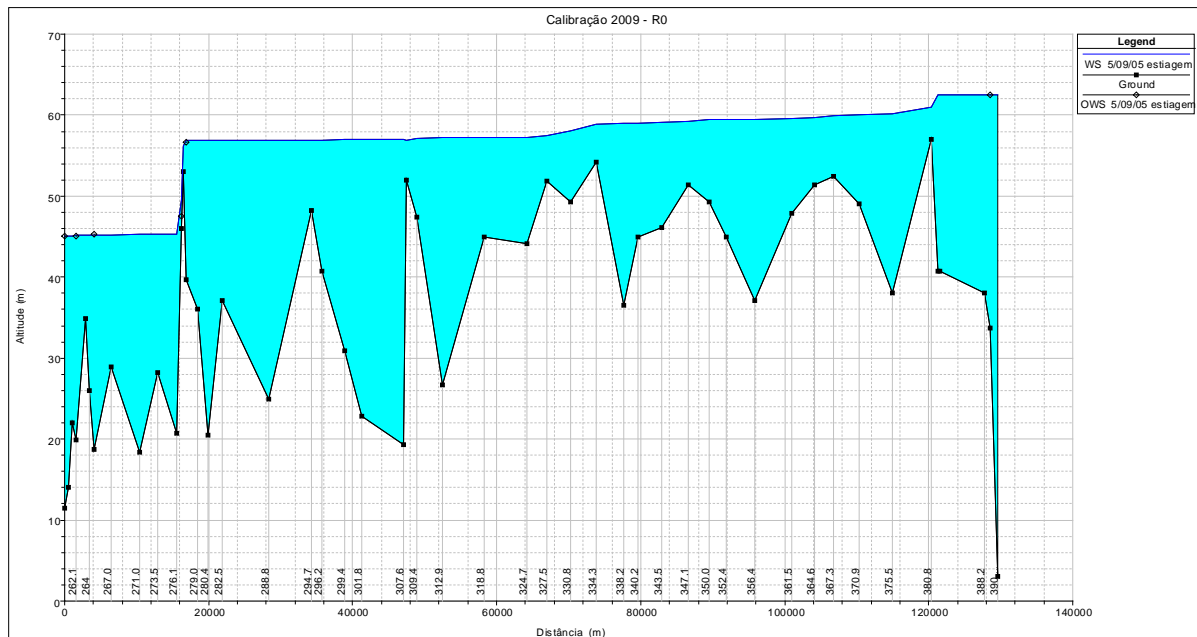
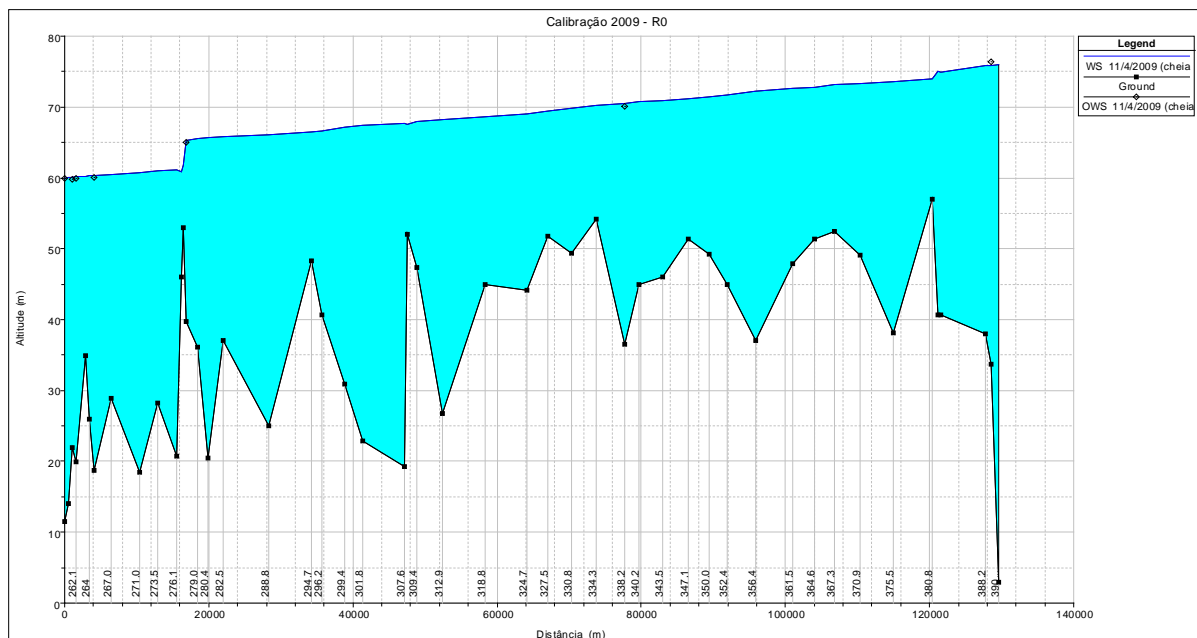


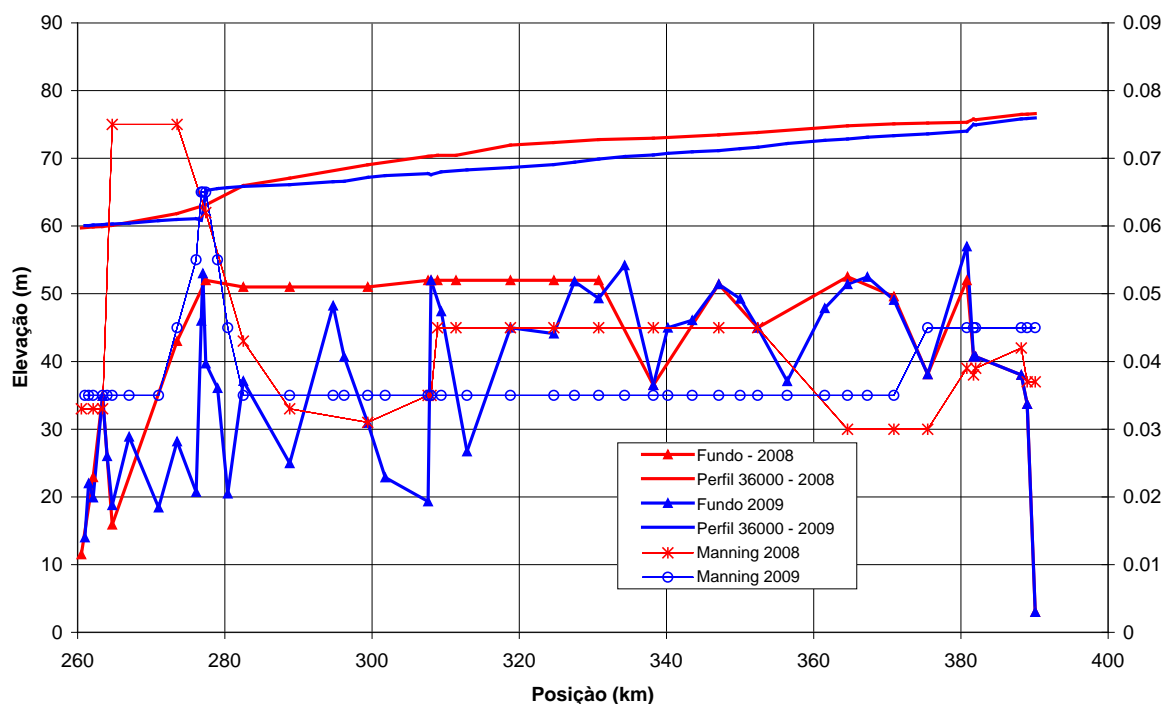
Figura 2.2.
Perfil de Enchente (11-04-2009) – Q = 36.073 m³/s



É importante ressaltar nesses resultados que o modelo, baseado nas novas seções topobatimétricas levantadas, consegue reproduzir de forma adequada os níveis d'água na foz do rio Jaci-Paraná, o que não ocorria com o modelo anterior.

A figura apresentada a seguir ilustra as diferenças entre o novo modelo do reservatório de Santo Antônio e aquele apresentado no Projeto Básico. As linhas em vermelho referem-se ao modelo de 2008 e as linhas azuis são do modelo atual. É interessante notar as diferenças entre os perfis de fundo e entre os coeficientes de Manning ajustados.

**Figura 2.3.
Trecho do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio
Comparação Entre os Modelos de 2008 e 2009**



2.2. MODELO UNIDIMENSIONAL NO TRECHO DE JUSANTE

A calibração do modelo hidráulico de jusante foi aprimorada com a inclusão de novas seções nas proximidades da barragem de Santo Antônio, obtidas do levantamento batimétrico para o modelo bidimensional.

Considerando a boa resposta obtida da aplicação do módulo de sedimentos do modelo HEC-RAS às condições atuais do rio Madeira, foram iniciados testes com um segundo modelo, tendo sido escolhido o modelo GSTARS-3, que possui a capacidade de analisar a distribuição espacial do sedimento em duas dimensões. O emprego desse modelo seria um avanço em relação ao trabalho realizado anteriormente.

Alguns resultados dessa experiência, ainda que não totalmente coroada de sucesso, já que o modelo apresentou instabilidade para algumas das fórmulas de transporte empregadas, são apresentados a seguir, precedidos de uma descrição do modelo.

2.2.1. Descrição do Modelo GSTARS 3.0

O programa computacional GSTARS 3.0 (*Generalized Sediment Transport Model for Alluvial River Simulation version 3.0*) faz parte de uma série de modelos computacionais

de hidráulica fluvial com tubos de fluxo (“*stream tubes*”) desenvolvido pelo U.S. Bureau of Reclamation para o cálculo de escoamento em regime permanente e “semi-permanente” (“*quasi-steady*”).

A primeira versão do modelo GSTARS foi desenvolvida por Molinas e Yang (1985) e já tinha a capacidade de cálculo do escoamento de forma semi-bidimensional, como, também, o cálculo da variação da geometria da seção transversal de forma semi-tridimensional, devido a modelagem baseada no conceito de tubos de fluxo (“*stream tubes*”).

A versão 3.0 do modelo GSTARS tem a capacidade de modelar o transporte de sedimentos coesivos e não-coesivos em rios e reservatórios. Uma descrição detalhada sobre o modelo GSTARS é apresentada no manual do usuário do modelo (Yang e Simões, 2002. “*User’s Manual for GSTARS3*”, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Sedimentation and River Hydraulics Group - Denver, Colorado).

As principais características e funcionalidades do modelo GSTARS 3.0 são:

- Possibilidade de efetuar o cálculo de parâmetros hidráulicos para canais de superfície livre com condições de contorno fixas e móveis.
- Possibilidade de cálculo de níveis d’água em regime de escoamento subcrítico, supercrítico e mixto, sem interrupções.
- Possibilidade da simulação e previsão de variáveis hidráulicas e sedimentológicas em ambas as direções, longitudinal e transversal.
- Possibilidade de simulação e previsão as mudanças do canal fluvial, perfil e geometria seções transversais, mesmo em condições de largura variável.
- Possibilidade de incorporar informações específicas para cada sub-trecho modelado.

O cálculo do remanso considera as equações de energia e momentum. O conceito de modelagem com “tubos de fluxo” também é implementado, viabilizando uma modelagem semi-bidimensional hidráulica e tridimensional para variação da geometria da seção. Assim, apesar de não considerar transferência de vazão entre tubos, o modelo possibilita a transferência de sedimentos devido à declividade transversal das seções e a velocidades em cada tubo decorrente da curvatura dos respectivos trechos.

O Modelo GSTARS permite a utilização de 14 tipos diferentes de algoritmo, para a equação de transporte de sedimentos, são eles:

- DuBoys (1879)
- Meyer-Peter e Müller (1948).
- Laursen (1958).
- Laursen modificado por Madden (1993).
- Toffaleti (1969).
- Engelund and Hansen (1972).
- Ackers and White (1973).
- Ackers e White (1990) Revisado.

- Yang (1973) areia e (1984) pedregulho.
- Yang (1979) areia e (1984) pedregulho.
- Parker (1990).
- Yang 1996 modificado para escoamento com altas concentrações (“wash load”).
- Ashida and Michiue (1972).
- Tsinghua University (IRTCES, 1985).
- Krone (1962) e Ariathurai e Krone (1976) – método para transporte de sedimentos coesivos.

2.2.2. Preparação dos Dados de Entrada do Modelo GSTARS

- Análise Granulométrica do Material Transportado

Foi realizada uma revisão da metodologia anteriormente utilizada para estimativa da granulometria do material do leito como função da descarga líquida. A partir da análise granulométrica do Histórico das Medições de Descarga Sólida realizadas no período de Nov/2003 a Jan/2007, foram ajustadas diversas curvas de descarga sólida para cada faixa granulométrica, conforme pode ser visualizado na figura a seguir.

**Figura 2.4.
Curva-Chave de Descarga Sólida Por Faixa Granulométrica Elaborado a Partir do Histórico das Medições Realizadas no Período de Novembro/2003 a Janeiro/2007**

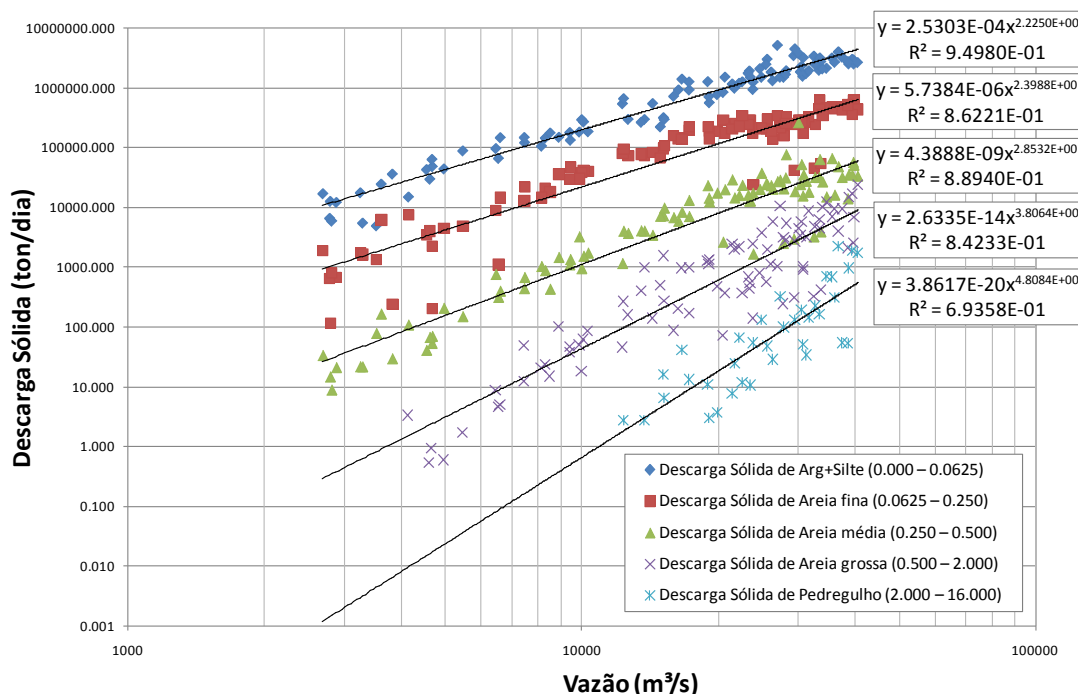


Tabela 2.1.
Descargas Sólidas Totais (ton/dia) por Classe de Vazão Média e Faixa Granulométrica

Descarga Líquida Média (m³/s)	Descarga Sólida Média de Argila + Silte (0.000 – 0.0625mm)	Descarga Sólida Média de Areia fina (0.0625 – 0.25mm)	Descarga Sólida Média de Areia média (0.25 – 0.50mm)	Descarga Sólida Média de Areia grossa (0.50 – 2.0mm)	Descarga Sólida Média de Pedregulho (2.0 – 16.0mm)
2500	9196	812	22	0	0
5558	54399	5522	212	5	0
10978	247374	28263	1482	63	1
17334	683446	84536	5454	359	9
22822	1260463	163543	11957	1024	35
27411	1894782	253799	20167	2056	84
32122	2696564	371289	31707	3760	181
58300	10157447	1551231	173681	36356	3177

A análise do percentual acumulado para cada classe de vazão média indicou um grande percentual de material fino (argila e silte), correspondendo a mais de 83% do peso média, para todas as classes consideradas, conforme é apresentado na Tabela abaixo.

Tabela 2.2.
Resultados do Percentual de Material Acumulado por Faixa Granulométrica e por Vazão Média

Vazão Líquida (m³/s) =		2500	5558	10978	17334	22822	27411	32122	58300	
Descarga Sólida Total (ton/dia) =		10943	64333	291002	801131	1474348	2213147	3145762	11794665	
Lim. Inf.	Lim. Sup.	Tipo	Percentual (%) da Descarga Sólida por Faixa Granulométrica e por Vazão							
0.0005	0.004	Argila	0.395	0.390	0.384	0.380	0.378	0.376	0.374	0.367
0.004	0.0625	Silte	0.522	0.515	0.508	0.503	0.499	0.497	0.495	0.485
0.0625	0.25	Areia fina	0.081	0.092	0.102	0.109	0.114	0.117	0.120	0.130
0.25	0.5	Areia média	0.002	0.004	0.005	0.007	0.008	0.009	0.010	0.015
0.5	2	Areia grossa	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003

- Análise Granulométrica do Material do Leito

Para avaliação da composição granulométrica do material no leito no trecho em análise, adotou-se metodologia semelhante à anteriormente utilizada para a construção do modelo HEC-RAS 4.0, ou seja, granulometria média calculada a partir de mais de 100 medições entre 2003 a 2006.

Tabela 2.3.

Distribuição Granulométrica Considerada no Material de Leito Resultados do Percentual de Material Acumulado por Faixa Granulométrica e por Vazão Média

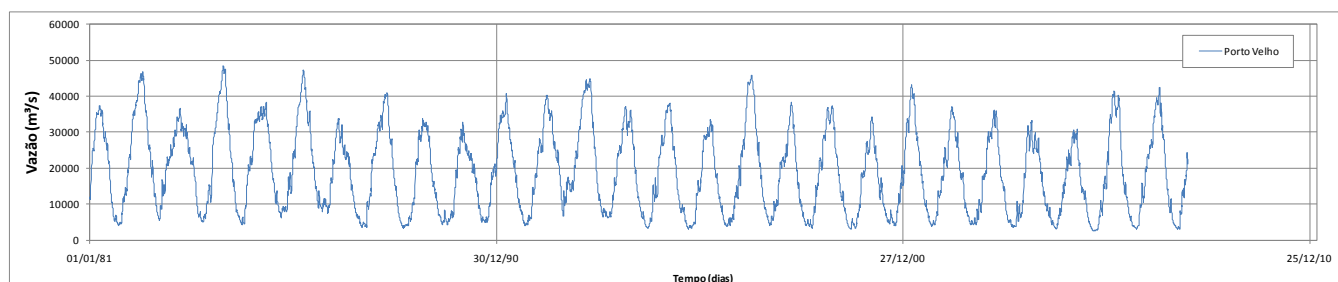
Tipo	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa
Limite Inferior (mm)	0,0005	0,004	0,0625	0,25	0,5
Limite Superior (mm)	0,004	0,0625	0,25	0,5	2,0
%	1,62	8,65	57,93	26,57	5,20
% acumulado	1,62	10,27	68,21	94,78	100,00

- Série de Vazões Características Consideradas na Modelagem

Para a construção do modelo do trecho de Jusante, além das informações sedimentológicas já discutidas, optou-se por simular um período de 27 anos de vazões diárias (ou seja, 9861 dias), utilizando-se o histórico de vazões passadas existente compreendido entre o período de 01/01/1981 a 31/12/2007. Assim, foram apropriadas as vazões médias diárias observadas em Porto Velho como condição de escoamento de montante. No entanto, para a presente modelagem, não foi considerado o aumento de vazão em função das contribuições incrementais a jusante de Porto Velho, equivalente em média a 10% das vazões. Uma ilustração da série de vazões médias diárias apropriada para a presente etapa de modelagem é apresentada na Figura abaixo.

Figura 2.5.

**Série de Vazões Diárias para o Período de Simulação do Modelo
(01/01/1981 a 31/12/2007)**



- Condições de Contorno de Jusante (em Humaitá) do Modelo Hidráulico

Como condição de contorno de jusante do modelo hidráulico foi adotada a curva-chave de descarga líquida atualmente em uso pela ANA para o período mais recente de dados, a partir da qual dada uma vazão é possível determinação do nível d'água correspondente.

- Análise de Sensibilidade das Equações de Transporte de Sedimentos

Por ser um dos fatores que mais pode afetar o resultado do modelo no que se refere ao módulo hidrossedimentológico e, conseqüentemente, alterações no leito, foi realizada

uma análise de sensibilidade com simulações incluindo diferentes métodos (equações) de modelagem matemática do transporte de sedimentos.

- Erodibilidade do Leito

O Modelo GSTARS permite a definição de limites (cotas) para controlar o volume erodível permitido. No entanto, este modelo não permite limitar uma espessura limite máxima. Assim, não é possível determinar erosão/deposição totalmente nula para uma determinada seção.

2.2.3. Resultados Preliminares

- Análise do Desempenho Hidráulico do Modelo GSTARS

Primeiramente, foi avaliado o desempenho do módulo de hidráulica fluvial do modelo. Esta avaliação foi realizada comparando-se os resultados encontrados com o modelo GSTARS 3.0 com os do modelo HEC-RAS 4.0, para duas vazões distintas. Admitiu-se, em ambos os casos, regime de escoamento permanente. Foram avaliados, ainda, os resultados do cálculo hidráulico em regime semi-permanente (“*quasi-steady*” – no modelo HEC-RAS 4.0 este tipo de escoamento é definido como “*quasi-unsteady*”) para duas vazões de mesma magnitude que as simuladas para o regime permanente, também utilizando-se do modelo GSTARS.

As figuras a seguir ilustram esses resultados, através do perfil de linha d’água para ambos os modelos, juntamente com um perfil de níveis observados para a respectiva vazão. Nota-se que o modelo GSTARS apresenta resultados bastante semelhantes aos obtidos com o modelo HEC-RAS. A exceção encontrada corresponde ao trecho mais a montante, mais especificamente a montante da cachoeira de Santo Antônio, com particular discrepância para a última seção (de montante) dos modelos. Essa seção, entretanto, corresponde a uma cachoeira, e sua modelagem requer a implantação de seções auxiliares, para evitar transferir para os parâmetros do modelo a responsabilidade pelas perdas de carga causadas por obstáculos naturais.

Figura 2.6.
Comparação entre Perfis de Linha d'Água Resultante dos Modelos Hidráulicos Testados HEC-RAS x GSTARS (para Q = 13.000 m³/s)

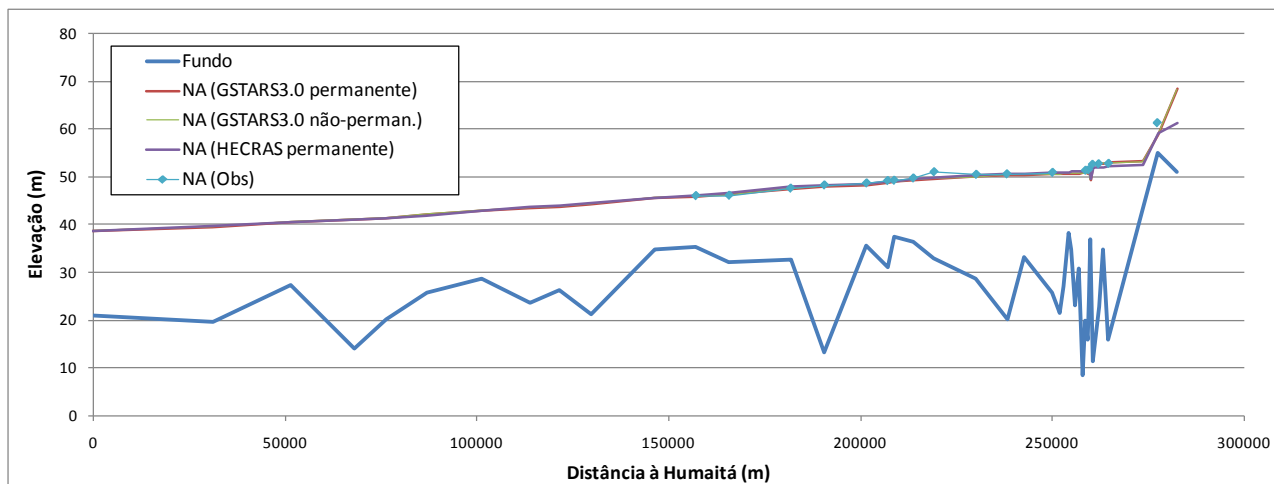
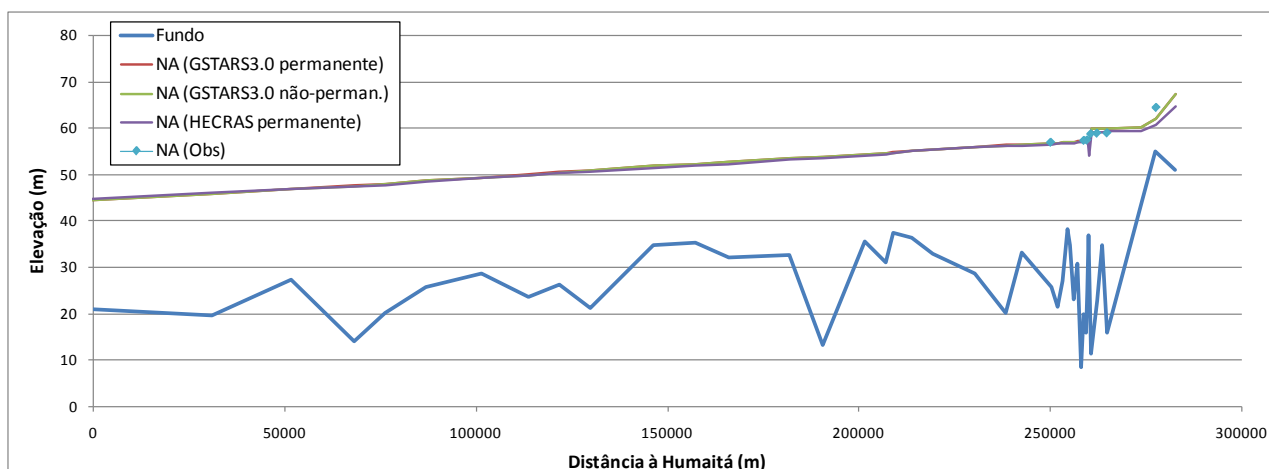


Figura 2.7.
Comparação entre Perfis de Linha d'Água Resultante dos Modelos Hidráulicos Testados HEC-RAS x GSTARS (para Q = 33.000 m³/s)



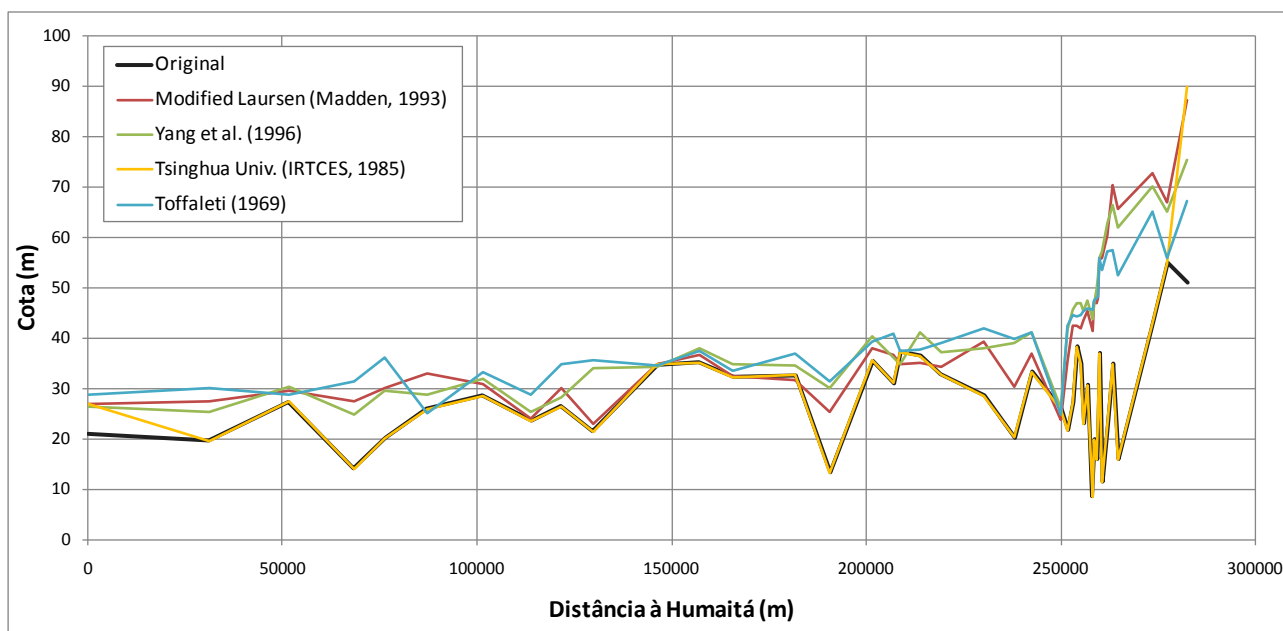
- Análise de Sensibilidade das Equações de Transporte de Sedimentos

Esta simulação teve como objetivo principal identificar a sensibilidade dos métodos e equações de transporte de sedimentos disponíveis no modelo GSTARS 3.0, podendo, assim, identificar a que melhor representasse o transporte de sedimentos no estirão modelado.

O Modelo GSTARS 3.0 permite a utilização de 14 tipos diferentes de algoritmo, para a equação de transporte de sedimentos, sendo testados nesta primeira análise os seguintes métodos: "Laursen Modificado", "Yang et al. (1996)", "Tsinghua univ. (1985)" e "Toffaletti". Na FIGURA abaixo são apresentados os resultados de perfil do fundo para todo o estirão modelado, encontrados no final do período modelado, para todas as equações de

transporte consideradas. Nota-se que os resultados encontrados não representam de forma realista o comportamento hidrossedimentológico esperado, visto que se observa, para todos os métodos, com exceção do método da Tsinghua University, uma taxa de deposição demasiadamente alta.

**Figura 2.8.
Comparação entre Perfis de Fundo (Talvegue) Resultantes do Modelo GSTARS 3.0
após Simulação de Vazões Diárias para o Período de 27 Anos Utilizando-se de
Diferentes Equações de Transporte de Sedimentos
(Escoamento Quase-Não-Permanente)**



2.2.4. Próximas Atividades Relacionadas ao Processo de Modelagem

- Continuar a construção e calibração do modelo GSTARS 3.0 com o objetivo de melhorar a sua representatividade para o trecho em estudo.
- Estudar a melhor configuração de escoamento a ser implementada nos modelos de simulação diária de longo termo, para representar as contribuições pontuais dos tributários e/ou vazões distribuídas, considerando-se a variação das vazões médias diárias observadas nos três postos fluviométricos (Abunã, Porto Velho e Humaitá) existente na região.
- Preparar os dados sedimentológicos para a construções dos modelos unidimensional dos outros trechos, bem como para o modelo 2-D.

2.3. MODELO BIDIMENSIONAL NO TRECHO JUNTO À BARRAGEM

2.3.1. Seleção e Aquisição dos Modelos

Esta atividade encontra-se concluída. O resultado da análise dos modelos foi apresentado no relatório de andamento precedente.

2.3.2. Geração Inicial da Malha do Modelo de Jusante

Foi iniciada a definição preliminar do domínio e a geração da malha de elementos finitos a ser empregada na modelagem, mas ainda sem uma definição da geometria do domínio (topobatimetria).

Os levantamentos batimétricos dos trechos a jusante e a montante da barragem foram recebidos, tanto na forma de uma tabela de pontos cotados, materializáveis através de coordenadas, quanto na forma de plantas topográficas do leito.

Para se iniciar a implantação da geometria do domínio a modelar, é necessário complementar os dados da batimetria do trecho para a parte seca do rio Madeira. Essa atividade, ainda em andamento, está sendo cumprida com auxílio das plantas da restituição aerofotogramétrica, devendo ser concluída até a emissão do próximo relatório de andamento.

A definição dos cenários a modelar, está sendo desenvolvida durante a visita do Eng. José Vasques, da NHC, no período de 27-07-2009 a 07-08-2009.