

**Ministério de Minas e Energia
Brasília – DF – Brasil**

Projeto Rio Madeira

Estudos Hidráulicos e de Sedimentos

Relatório Preliminar (Tradução)



Sultan Alam
Consultor Independente

Janeiro de 2007

Tabela de Conteúdo

*

Introdução

- Descrição Geral do projeto
- Visita ao sítio do projeto e principais observações
- Objetivo do relatório

Conclusões e Recomendações

- 1. Revisão geral da hidrologia do rio e dados sobre transporte de sedimentos.**
 - 1.1. Hidrógrafas anuais da vazão do rio, curvas de permanência de vazão e dados de vazão de sedimento**
 - 1.2. Aumentos da profundidade de água ao longo do reservatório a fio d'água para várias vazões e cota de 70,00 m.**
 - 1.3. Velocidades médias locais de fluxo para várias vazões ao longo do reservatório a fio d'água.**
- 2. Análise das características de transporte de sedimento entre Jirau e Santo Antônio**
 - 2.1. Características de transporte de sedimentos com condições naturais para as seguintes vazões do rio: 5.000; 10.000; 18.000; 39.100; 40.000; 61.200; 72.600 e 84.000 m³/s.**
 - 2.2. Características de transporte de sedimentos com o reservatório a fio d'água de AHE Santo Antônio para as seguintes vazões do rio: 5.000; 10.000; 18.000; 39.100; 48.600; 61.200; 72.600 e 84.000 m³/s.**
- 3. Principais Observações e Conclusões**
 - 3.1. Condições de fluxo do rio entre Jirau e Santo Antônio**
 - 3.2. Condições de transporte de sedimento entre Jirau e Santo Antônio**
 - 3.3. Necessidades de melhorar o processo de evacuação de areias grossas e cascalhos finos através do vertedouro com mudança do arranjo do projeto.**
- 4. Anexo – I**
 - **Necessidade de um estudo compreensivo de modelo hidráulico.**
 - **Otimização do arranjo do projeto e desenho hidráulico.**
 - **Evacuação segura de areia.**
 - **Transporte de madeira flutuante e submerso³**
 - **Formação de vórtices de entrada de ar nas tomadas d'água das turbinas bulbo**
 - **Perda na tomada d'água e canal de fuga**
 - **Seqüências de construção**
- 5. Figuras**
- 6. Fotos**
- 7. Apêndices** (Cálculo das características de transporte de areia e cascalho fino ao longo do rio entre o km 0,0 e o km 125,8 para vazões do rio com condições de fluxo naturais e com o reservatório a fio d'água na cota 70,00 m):

I	-	Q = 5,000 m ³ /s Natural river flow conditions
IA	-	Q = 5,000 m ³ /s With storage (ponding)

II	-	Q = 10,000 m ³ /s Natural river flow conditions
IIA	-	Q = 10,000 m ³ /s With storage (ponding)
III	-	Q = 18,000 m ³ /s Natural river flow conditions
IIIA	-	Q = 18,000 m ³ /s With storage (ponding)
IV	-	Q = 39,100 m ³ /s Natural river flow conditions
IVA	-	Q = 39,100 m ³ /s With storage (ponding)
V	-	Q = 48,600 m ³ /s Natural river flow conditions
VA	-	Q = 48,600 m ³ /s With storage (ponding)
VI	-	Q = 61,200 m ³ /s Natural river flow conditions
VIA	-	Q = 61,200 m ³ /s with storage (ponding)
VII	-	Q = 72,600 m ³ /s Natural river flow conditions
VIIA	-	Q = 72,600 m ³ /s with storage (ponding)
VIII	-	Q = 84,000 m ³ /s Natural river flow conditions
VIIIA	-	Q = 84,000 m ³ /s with storage (ponding)

Apresentação em PowerPoint: Rio Madeira – Santo Antônio Hydro Project, January 12, 2007.

Apresentação em PowerPoint: Site Visit at Porto Velho December 15, 16 & 17, 2006.

Tradução: Eng. John Denys Cadman – Consultor MME
 Revisão: Eng. Eduardo de Freitas Madeira – Consultor MME

Introdução

Objetivo do Relatório

O objetivo do relatório é avaliar os aspectos de gerenciamento dos sedimentos da AHE Santo Antônio conforme projetado pela PCE, Furnas e Odebrecht, formar conclusões e fazer recomendações adequadas, atingindo assim os objetivos desejados.

As preocupações principais dos engenheiros do Ministério de Minas e Energia (MME) são de confirmar que o arranjo geral do projeto pode gerenciar adequadamente os sedimentos no reservatório a fio d'água* com respeito aos seguintes aspectos:

- A. O plano de gerenciamento dos sedimentos para o reservatório a fio d'água e o projeto das estruturas hidráulicas devem garantir a operação confiável da usina.
- B. A quantidade e composição mineralógica dos sedimentos transportados pelo rio Madeira devem merecer atenção especial.
- C. O processo de transporte de sedimento através do reservatório a fio d'água, o impacto que os sedimentos retidos podem ter nas áreas inundadas, as possíveis alterações nas curvas de remanso do reservatório a fio d'água durante a vida do projeto na operação, manutenção e vida econômica da usina.

Estes itens de referência implicam que seria necessário analisar o seguinte:

- As condições de operação das estruturas individuais como casa de força e vertedouro e seu impacto no transporte do sedimento de fundo.
- Os detalhes no mecanismo de transporte dos sedimentos ao longo dos 125 km do trecho do rio entre Jirau e Santo Antônio para as várias vazões do rio entre 5.000 m³/s e 84.000 m³/s.
- Além de identificar as áreas de sedimentação e seus efeitos eventuais nos perfis do fluxo de água, este relatório deve verificar o trânsito de areia na casa de força e vertedouro. Assim, o arranjo do projeto e as posições das várias estruturas devem ser revistos na tentativa de reduzir, na medida do possível, a entrada de areias e cascalhos finos nas tomada d'água das unidades bulbo.

* Foi adotada a expressão mais usada no Brasil, "reservatório a fio d'água", para traduzir a expressão "pool" que o autor usa para denominar o corpo d'água que se forma com a construção da barragem, sem capacidade de reservar ou armazenar água e que, entretanto, tem diferenças em relação à calha natural do rio.

Descrição Geral do Projeto

O projeto de baixa queda de Santo Antônio está localizado na corredeira do mesmo nome no rio Madeira, imediatamente a montante da cidade de Porto Velho, no estado de Rondônia. A usina tem uma capacidade instalada de 3.150 MW com 44 unidades tipo bulbo e com vazão total de 24.000 m³/s. O projeto tem um vertedouro com 21 comportas de segmento, cada uma com 21,03 m de altura e 20 m de largura e vazão total de 84.000 m³/s. O nível máximo normal é 70,00 m com nível máximo máximo de 72,00 m para a vazão máxima de cheia de 84.000 m³/s. Durante a época de águas baixas, o reservatório a fio d'água tem 125 km de comprimento até o salto de Jirau. Para vazões acima de 39.100 m³/s, os níveis máximos do reservatório a fio d'água são os mesmos níveis das cheias naturais a partir de 60 km a montante da usina de Santo Antônio.

Visita ao Sítio e Principais Observações

Uma visita ao sítio foi organizada entre 15 e 17 de dezembro de 2006 pelos engenheiros do Ministério de Minas e Energia (MME). A equipe incluiu o Dr. John Denys Cadman, Consultor do MME, Dra. Jennifer Sara, Coordenadora Regional do Banco Mundial e S. Alam, Consultor. O tempo na área do projeto estava bom e foi possível visitar o sítio do projeto além dos trechos do rio a jusante do sítio e a montante do sítio até o salto de Teotônio, localizado 17 km rio acima. Agradecemos à Eletronorte, em especial ao Sr. Lima, que forneceu apoio técnico e material, sem o qual teria sido impossível atingir os objetivos.

Observações Principais

- A vazão do rio estava em torno de 10.000 m³/s, baixo para esta época do ano.
- Os níveis d'água a montante e a jusante da corredeira de Santo Antônio estavam em 50,50 m e 49,50 m respectivamente, conforme as curvas-chave (a leitura de régua junto à estação de bombeamento indicou o nível d'água na cota _ _ _).
- Foram feitas tentativas de coletar materiais do fundo do rio em 20 locais diferentes. Devido ao mau funcionamento do amostrador e também devido à presença de afloramentos de rocha, somente 6 amostras foram coletadas. (Ref. Figura ...). Exame visual e tátil indicou que a maioria das amostras foram de areias finas a muito finas (0,0062 mm a 0,50 mm) com um pouco de silte grosseiro. Somente a amostra n.º 19 tinha areia grossa a cascalho fino (1,00 mm a 10,00 mm). A forma dos grãos de areia grossa e dos grãos dos cascalhos finos maiores eram parcialmente redondas. Somente os maiores grãos de cascalho fino eram angulares, sendo de origem provável do salto Teotônio. Uma fração importante da amostra parece ser origem de quartzito (foto 7).
- Vimos deslizamentos menores de material (foto 10) de dois barrancos, indicando assim que uma certa quantidade de material aluvial sedimentar estava sendo acrescida ao fluxo ao longo do rio.
- A amostra 19 coletada na praia submersa confirma que, de acordo com o canal do rio natural com cheia máxima de 45.000 m³/s, o tamanho máximo dos grãos sendo transportados neste trecho do rio é provavelmente entre 4,00 e 5,00 mm (foto 7) e quase todas estas areias grossas e cascalhos finos fazem parte da carga de fundo, isso quer dizer que elas estão em suspensão, movimentando-se perto do fundo do rio, ou estão em saltitação (saltos intermitentes no fundo do rio) ou em arraste (andando ao longo do

fundo do rio sem levantar do fundo). Também estes materiais grosseiros estão movendo-se somente no barranco direito do rio na curva imediatamente a montante do eixo do projeto.

- Este fato confirma que a posição do vertedouro no lado direito do rio é uma escolha boa. Entretanto, o arranjo do projeto e as escavações no fundo e margens do rio podem modificar bastante as velocidades e distribuição do fluxo além das correntes secundárias nesta área. Estes fatos podem eventualmente influenciar a direção do movimento da carga de fundo. Somente um modelo hidráulico corretamente projetado pode nos permitir determinar com certeza o movimento da carga de fundo com a usina e vertedouro em operação e assim confirmar que o grosso da carga de fundo passa de fato pelo vertedouro.

- Durante nossa viagem no rio, tanto a jusante como a montante, ficamos impressionados pela quantidade e tamanho do material flutuante na superfície do rio. As árvores eram de 5 m a 10 m em comprimento com diâmetros de cerca de 0,3 m a 0,5 m e, pode ser assumido, que o material submerso é de tamanho igual (de acordo com informações disponíveis na usina hidrelétrica Sidney A. Murray no rio Mississipi, o material submerso é de cerca de 20 a 30%). De fato, o imprudente piloto do nosso barco quebrou o pino da hélice 4 vezes na tentativa de passar pelo material flutuante. No final ele quebrou o motor de popa de 45 HP. Felizmente, nós encontrávamos perto da margem do rio e longe da corredeira. Assim podemos chegar à terra firme e voltar ao ponto de saída com outro barco sem prejuízo.

- Considerando que o comprimento da usina é de cerca de 1.050 m, do vertedouro de 500 m e da barragem de enrocamento de 900 m, este material flutuante teria muitas áreas para acumular e limpa-grades convencionais projetados para material muito mais leve não devem limpar este material flutuante do rio Madeira. Não conheço o tipo de equipamento limpa-grades previsto para Santo Antonio, mas baseado na minha experiência na usina Sidney A. Murray no rio Mississipi em Lousiana, posso dizer que o projeto deve ser específico para o sítio.

Conclusões

O arranjo proposto: Casa de força na margem esquerda ou meio do rio e vertedouro na margem direita deve encaixar bem com a configuração existente de transporte de sedimento imediatamente a montante do sítio do projeto. Entretanto, o arranjo proposto junto com as escavações no leito e margens do rio e aumento da profundidade do rio pode modificar as velocidades de fluxo e, em especial, as correntes secundárias, assim influenciando o movimento da carga de fundo. O impacto destas modificações junto com as vazões do rio e modos de operação do projeto devem ser analisados usando um modelo hidráulico.

Baseado nas observações do rio e do sítio do projeto pode-se concluir que, se não forem bem gerenciados os materiais flutuantes e submersos, eles podem ser uma fonte de dificuldades de operação logo depois que o projeto seja comissionado. Além do gerenciamento do sedimento, o controle dos materiais flutuantes e submersos deve merecer atenção igual.

Conclusões e Recomendações

Comparados com a concentração máxima de sedimento medida atualmente de 3.500 ppm, futuras concentrações máximas devem ser muito mais, cerca de 10.000 a 20.000 ppm, devido a acumulação de areia durante as vazões abaixo de 18.000 m³/s e a lavagem anual destes sedimentos durante as altas vazões de 30.000 m³/s ou mais. A forma da hidrógrafa anual indica que cerca de 4 meses de vazões acima de 30.000 m³/s ou mais são garantidas todos os anos.

Segregação e acumulação de areias grossas e cascalhos finos tem sido observados a cerca de 2.000 m a montante do projeto. Cuidados devem ser empregados na seleção da locação das estruturas de concreto de maneira a facilitar a passagem destas areias e cascalhos pelo vertedouro. O conteúdo de quartzo da rocha do embasamento é de cerca de 40 %. No momento não sabemos a composição mineralógica das areias do leito do rio.

As curvas de remanso não devem sofrer impactos importantes uma vez que as velocidades do fluxo são altas e o transporte das areias deve ser em suspensão dentro do total do reservatório. Assim não devem ser formados grandes depósitos de areia nas áreas do remanso nem nas áreas perto da usina. Este projeto, como todos os projetos a fio d'água, deve operar normalmente e ter uma vida longa.

Madeira flutuante e submersa pode criar dificuldades de operação sérias. Equipamentos para remover estas matérias devem ser projetados, construídos e operados especificamente para o local. A concepção e projeto especial devem assegurar o desempenho desejado.

Mudanças importantes no conceito e arranjo do projeto são possíveis e uma reavaliação permitindo o melhoramento do conceito do projeto, redução de custos e tempo de construção é recomendada.

Um modelo físico hidráulico deve ser construído e operada para otimizar:

- O arranjo do projeto com a passagem das areias pelo vertedouro;
- A limpeza das madeiras flutuantes e submersas e prevenção de grandes entulhos;
- A prevenção da formação de vórtices de ar na águas;
- O desempenho e operação de todas as estruturas hidráulicas

1. Revisão geral da hidrologia do rio e dados sobre transporte de sedimentos.

1.1. Hidrógrafas anuais da vazão do rio, curvas de permanência de vazão e dados de vazão de sedimento.

As Figuras 7, 23, 7, 24 e 7.25 mostram as hidrógrafas anuais do rio Madeira em Guajará-Mirim, Abunã menos Guajará – Mirim e Porto Velho para os anos 1982, 1984 e 1986. A vazão do rio aumenta em geral de outubro/novembro a abril/maio e diminui entre abril/maio e outubro/novembro. A Figura 7.35 mostra a curva média mensal de permanência de vazão máxima da casa de força, de 24.000 m³/s, que é superada cerca de 30% do tempo e a máxima

cheia anual, de 45.000 m³/s. A máxima vazão diária anotada foi de 48.570 m³/s no dia 14 abril de 1984.

A vazão de sedimento do rio Madeira na sua confluência no rio Amazonas é estimada em 500 milhões de toneladas por ano conforme Robert Meade do USGS (Figura 7.70).

A concentração máxima do sedimento em suspensão medida em Porto Velho por FURNAS é 3.500 ppm ou 3.500 mg/l quando a vazão do rio foi de 30.000 m³/s. Esta é provavelmente a vazão representativa na qual a taxa de subida do nível d'água é mais rápida, produzindo a maior inclinação da linha d'água e causando fluxo repentino na concentração do sedimento. A carga máxima diária do sedimento neste tempo em 16/02/2004 foi de 9.210.039 toneladas e a correspondente carga sedimentar diária em suspensão foi de 8.889.566 toneladas (ref. Tabela 7.69). Na média a carga de fundo é cerca de 6% da carga sedimentar total (ref. Tabela 7.74).

A composição média da carga em suspensão no rio Madeira em Santo Antônio é indicada na tabela seguinte (ref. Tabela 7.75):

Argila	Silte	Areia
26,5	63,7	9,8

A composição média do material no fundo do rio é indicada na tabela seguinte (ref. Tabela 7.76):

Argila	Silte	Areia
1,2	7,8	91,0

O relatório conclui que a composição sedimentar total representativa em Proto Velho deve ser a seguinte (ref. Tabela 7.77):

Material	% Argila	% Silte	% Areia
Suspensão	25,0	60,1	9,3
Carga de Fundo	0,1	0,4	5,2
Total	25,0	60,6	14,4*

* Arredondada em 15% para o propósito de análise deste relatório

O material de fundo amostrado durante a visita aos sítios confirma qualitativamente algumas das curvas de distribuição dos grãos indicados na Figura 4.17 do relatório PCE, Furnas e Odebrecht, onde a distribuição característica dos grãos de três locais diferentes está indicada nas tabelas seguintes:

TARUMÃ

% <	10	30	50	60	90	100
d (mm)	0.15 - 0.20	0.20 - 0.31	0.22 - 0.39	0.25 - 0.40	0.35 - 0.82	0.50 - 2.00
Av. d (mm)	0.17	0.25	0.30	0.32	0.58	1.25

CAMALEÃO

% <	10	30	50	60	90	100
d (mm)	0.18 - 0.22	0.25 - 0.35	0.38 - 0.46	0.38 - 0.52	0.70 - 1.20	3.00 - 5.00
Av. d (mm)	0.20	0.30	0.42	0.45	0.95	4.00

PAULINO

% <	10	30	50	60	90	100
d (mm)	0.38 – 0.42	0.52 – 0.62	0.77 -1.30	0.92 -1.50	2.20 – 2.70	4.00 – 5.00
Av. d (mm)	0.40	0.57	1.03	1.21	2.45	4.50

Grãos de sedimento mais grossa achada na ilha de Camaleão são de material mais leve (provavelmente não granito) como pode ser visto na foto nº ----- . Amostras de sedimento coletadas na praia do Paulino, localizada no interior de uma volta semicircular, cerca de 2.000 m a montante do eixo do projeto, tem areia grossa e cascalhos finos bem segregados. Este material, em nossa opinião, é uma acumulação segregada de areias mais grossas e cascalhos finos e não é representativa da carga arenosa do rio Madeira. O conhecimento do processo de segregação dos grãos e a migração de areias grossas nesta área são de interesse principalmente na locação das estruturas, casa de força e vertedouro, dentro do arranjo geral do projeto.

O grosso da carga de areia é menor de 1,00 mm de diâmetro e, dependendo dos trechos dos rios, os grãos de areia de 2 a 3 mm podem ser transportados em suspensão ou em saltação durante o pico da cheia anual de vazões de 40.000 m³/s com as condições do canal do rio existentes.

Considerando que cerca de 15% da carga total em suspensão é de areia (ref. Tabela 7.77), a carga anual de areia deve ser de: 0,15 x 500.000.000 toneladas = 75.000.000 toneladas. Disso 95% ou 71.250.000 toneladas deve estar entre 0,10 a 1,00 mm e 5% ou 3.750.000 toneladas deve estar entre 1 a 3 mm (ref. Figura 7.17).

Depois da construção da barragem, as condições de transporte dos sedimentos devem ser modificados significativamente ao longo de toda a reservatório a fio d'água para vazões menores (5.000 a 10.000 m³/s). Entretanto para vazões maiores (> 10.000 m³/s) as modificações serão sobre cerca de 48% da calha. Esse relatório deverá permitir que possamos determinar como os grãos de areia até 1,00 mm e aqueles entre 1,00 e 3,00 mm vão se deslocar ao longo do rio entre Jirau e Santo Antônio com o reservatório a fio d'água na cota 70,00m e para as várias condições de vazão anuais.

1.2 Aumentos da profundidade de água ao longo do reservatório a fio d'água para várias vazões e cota de 70,00 m.

O fundo do rio entre Santo Antonio e Jirau não é um fundo aluvial uniforme de areia. Ele tem vários afloramentos de rocha na forma de ilhas, soleiras e corredeiras (nós não visitamos todo o comprimento da calha). A inclinação longitudinal da superfície da água não é contínua. Como consequência disso o aumento da profundidade de água devido à construção do projeto de Santo Antônio deve ser limitada ao trecho a jusante do reservatório a fio d'água ao longo de 48% de seu comprimento, diminuindo gradativamente com vazões maiores do que 39.000 m³/s.

A figura 1.2.1 e a figura 1.2.2 mostram as variações de profundidade para as vazões de 5.000; 10.000; 18.400; 39.100; 48.600; 61.200; 72.600; e 84.000 m³/s.

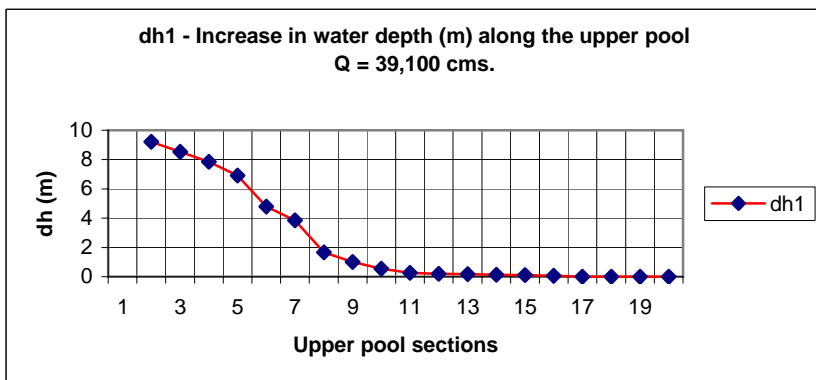
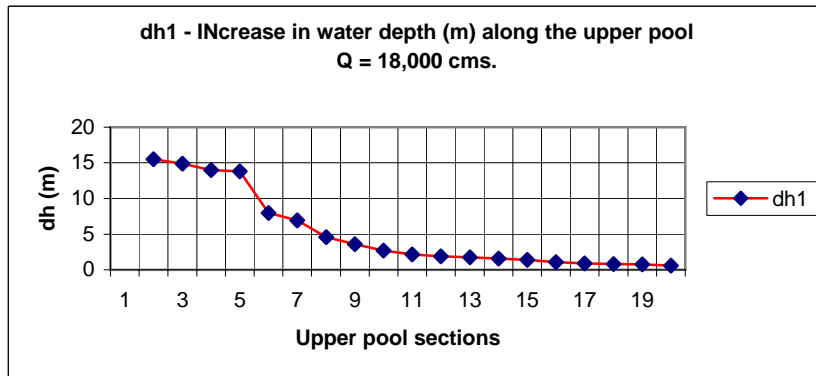
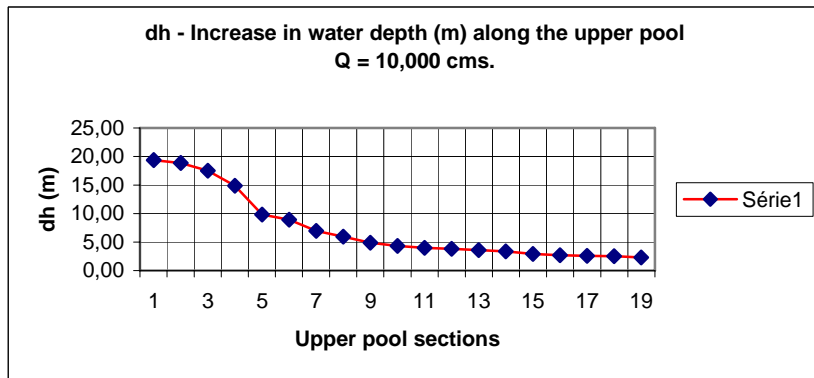
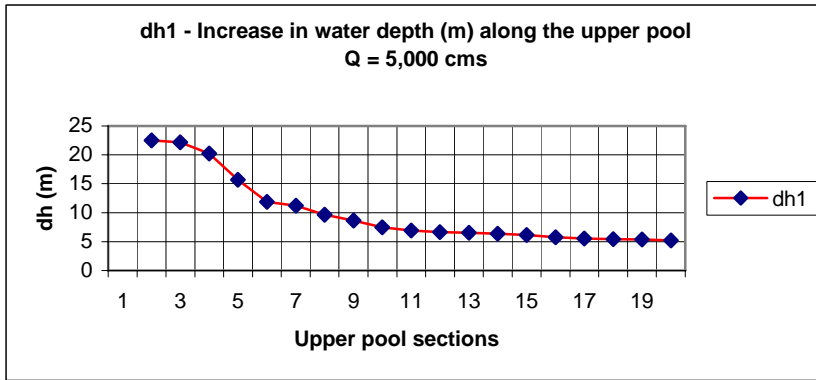


Figura – 1.2.1

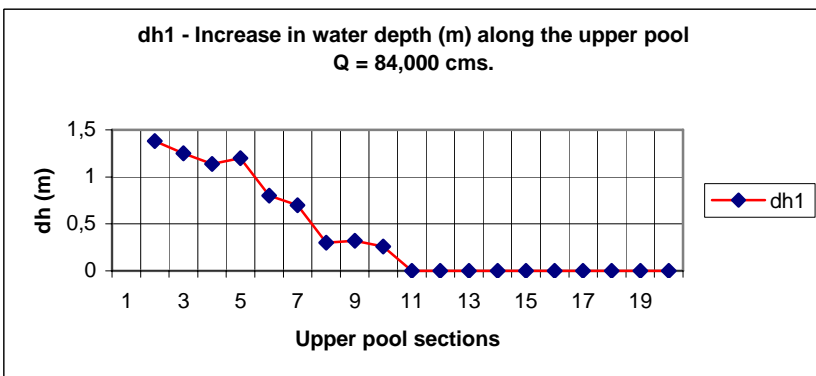
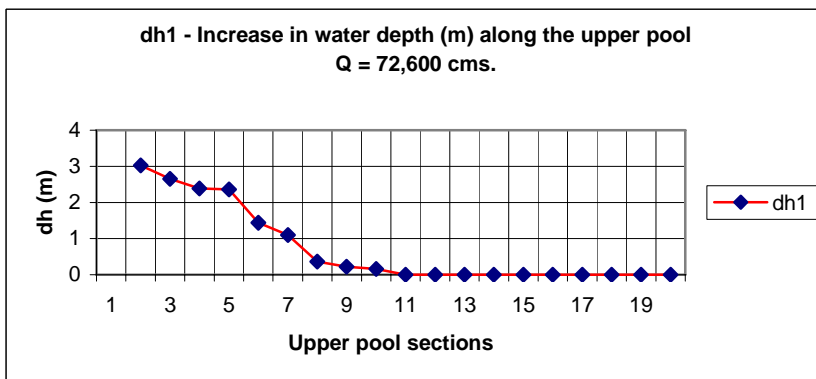
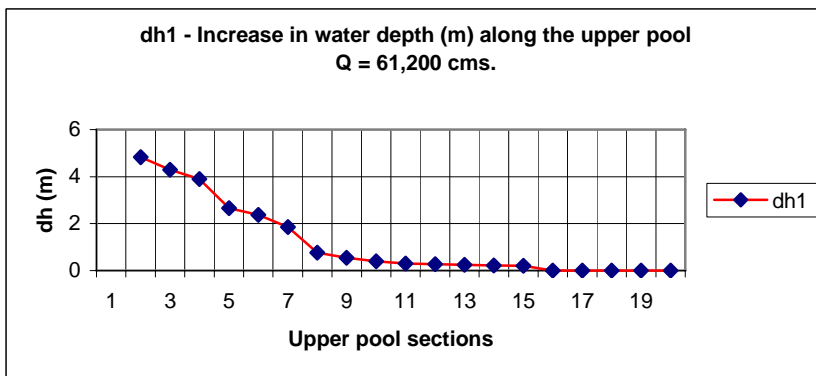
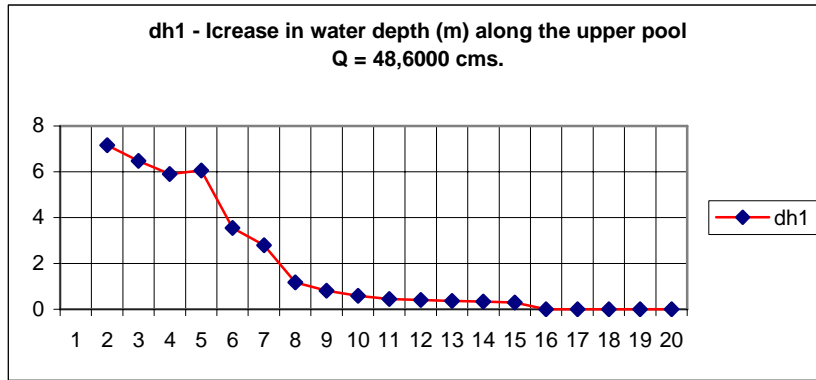


Figura – 1.2.2

Pode ser observado que o maior incremento de profundidade no sítio do projeto é de 22,49 m para uma vazão de 5.000 m³/s e o mínimo é de 1,38 m para a vazão máxima do projeto de 84.000m³/s. As tabelas mostrando os detalhes destas figuras estão no APENDICE A1.

É evidente que, com o aumento da vazão, os níveis de água a montante da seção 10 aproximam-se dos níveis de água naturais. Para as cheias anuais com vazões de 39.100 m³/s e 46.100 m³/s o incremento em profundidade é de apenas 1,66 m e 1,18 m respectivamente. Assim anualmente parte dos sedimentos que devem ser depositados no reservatório a fio d'água durante as vazões baixas deve iniciar seu movimento para jusante durante as vazões altas, em especial em vazões acima de 39.100 m³/s. A concentração média do sedimento nestes períodos pode ser muito maior do que a máxima medida (3.500 ppm) e podem ser de 10.000 a 20.000 ppm ou 10.000 a 20.000 mg/l ou 10 a 20 kg/m³ (valores esses frequentemente observado em reservatórios cheios de sedimento). O impacto de tão pesada concentração de sedimento, da qual uma fração importante, mais do que 15 % do observado atualmente será areia, pode passar pelas turbinas durante um certo período de tempo a menos que o vertedouro, que deve estar operando nestas vazões, seja capaz de atrair o grosso das concentrações do sedimento mais pesado através das aberturas das comportas. O procedimento de operação para atingir este objetivo deve ser eventualmente desenvolvido com a ajuda dos estudos em modelo hidráulico reduzido.

1.3 Velocidades médias locais de fluxo para várias vazões ao longo do reservatório a fio d'água.

A velocidade local de fluxo medida é um bom indicador da capacidade de transporte dos sedimentos naquele local. Nós então comparamos as velocidades de fluxo com a reservatório a fio d'água na cota 70.000 m com aquelas para as condições naturais e suas diferenças. As Tabelas e figuras (1 a 8) sumarizam os vários casos.

Average local flow velocities			
Q = 5,000 m ³ /s			
Sections	With Pool V (m/s)	Nat. Cdn. V (m/s)	Dimunition (m/s)
S-5	0,15	0,30	0,15
S-6	0,19	0,73	0,54
S-7	0,11	0,45	0,34
S-8	0,25	1,18	0,93
S-9	0,19	0,44	0,25
S-10	0,27	0,58	0,31
S-11	0,24	0,44	0,20
S-12	0,14	0,25	0,11
S-13	0,25	0,40	0,15
S-14	0,20	0,30	0,10
S-15	0,17	0,25	0,08
S-16	0,17	0,21	0,04
S-17	0,20	0,29	0,09
S-18	0,26	0,35	0,09
S-19	0,17	0,25	0,08
S-20	0,22	0,31	0,10
S-21	0,16	0,19	0,03
S-22	0,23	0,28	0,05
S-23	0,17	0,20	0,03

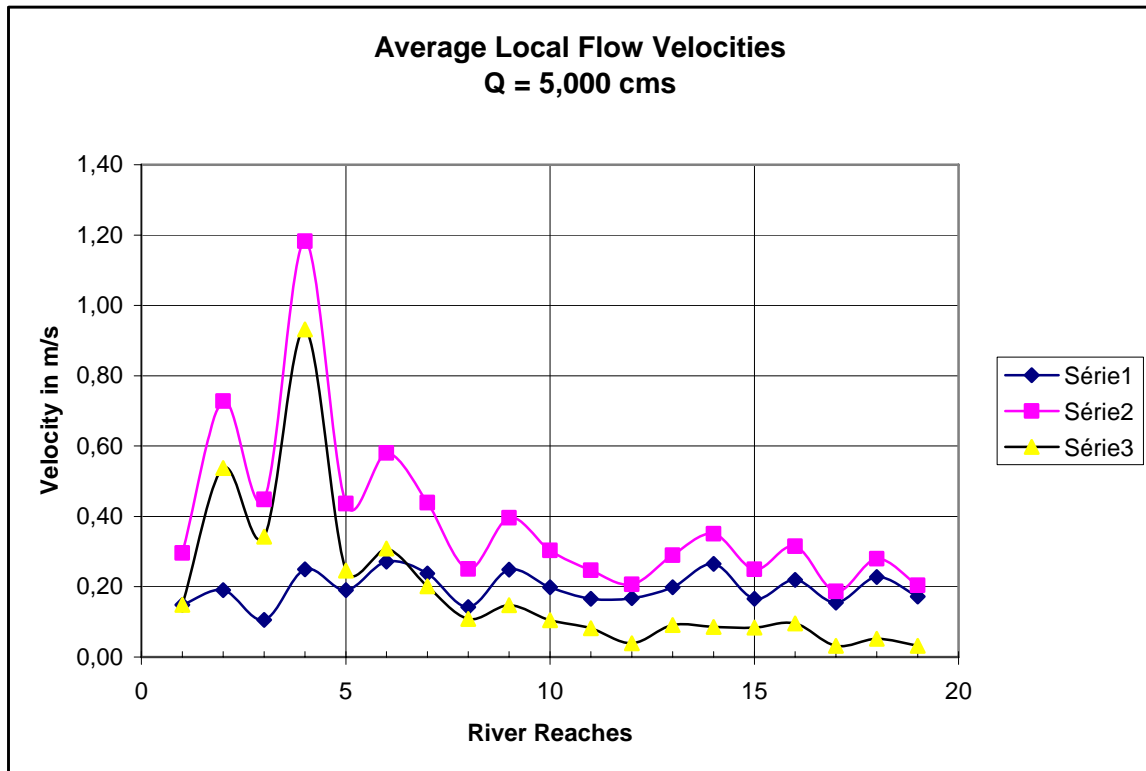


Tabela & Figura - 1

Average local flow velocities			
Q =10,000 m3/s			
Sections	With Pool V (m/s)	Nat. Cdn. V (m/s)	Dimunition (m/s)
S-5	0,30	0,52	0,22
S-6	0,38	1,02	0,64
S-7	0,21	0,60	0,39
S-8	0,50	1,94	1,44
S-9	0,38	0,71	0,33
S-10	0,54	0,94	0,40
S-11	0,47	0,70	0,23
S-12	0,28	0,40	0,12
S-13	0,49	0,65	0,16
S-14	0,39	0,50	0,10
S-15	0,32	0,40	0,08
S-16	0,33	0,37	0,04
S-17	0,39	0,47	0,08
S-18	0,52	0,60	0,08
S-19	0,32	0,38	0,06
S-20	0,42	0,49	0,07
S-21	0,30	0,33	0,03
S-22	0,45	0,49	0,04
S-23	0,34	0,36	0,02

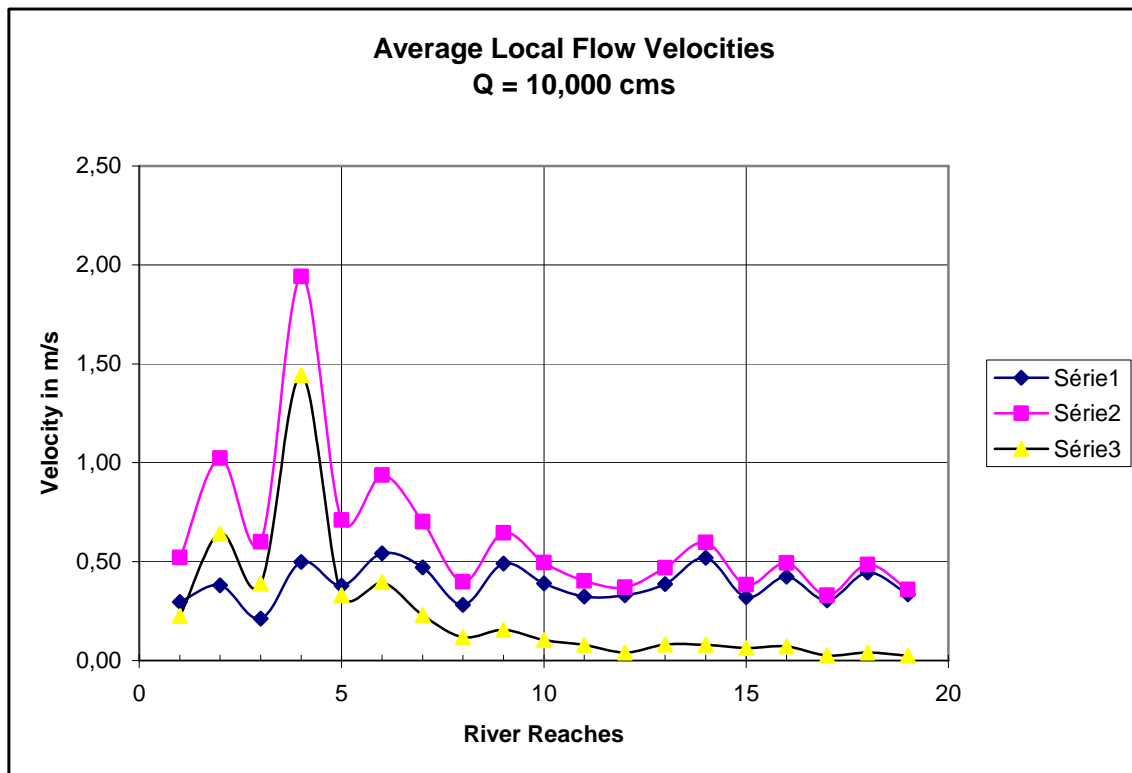


Tabela & Figura -2

Average local flow velocities			
Q = 18,000 m ³ /s			
Sections	With Pool V (m/s)	Nat. Cdn. V (m/s)	Dimunition (m/s)
S-5	0,53	0,81	0,28
S-6	0,68	1,36	0,67
S-7	0,38	0,78	0,40
S-8	0,90	2,86	1,96
S-9	0,68	1,09	0,41
S-10	0,97	1,43	0,47
S-11	0,83	1,06	0,22
S-12	0,49	0,59	0,10
S-13	0,85	0,97	0,12
S-14	0,67	0,75	0,08
S-15	0,56	0,61	0,05
S-16	0,58	0,61	0,03
S-17	0,66	0,71	0,05
S-18	0,89	0,94	0,05
S-19	0,54	0,57	0,03
S-20	0,71	0,74	0,03
S-21	0,52	0,54	0,01
S-22	0,76	0,78	0,02
S-23	0,58	0,59	0,01

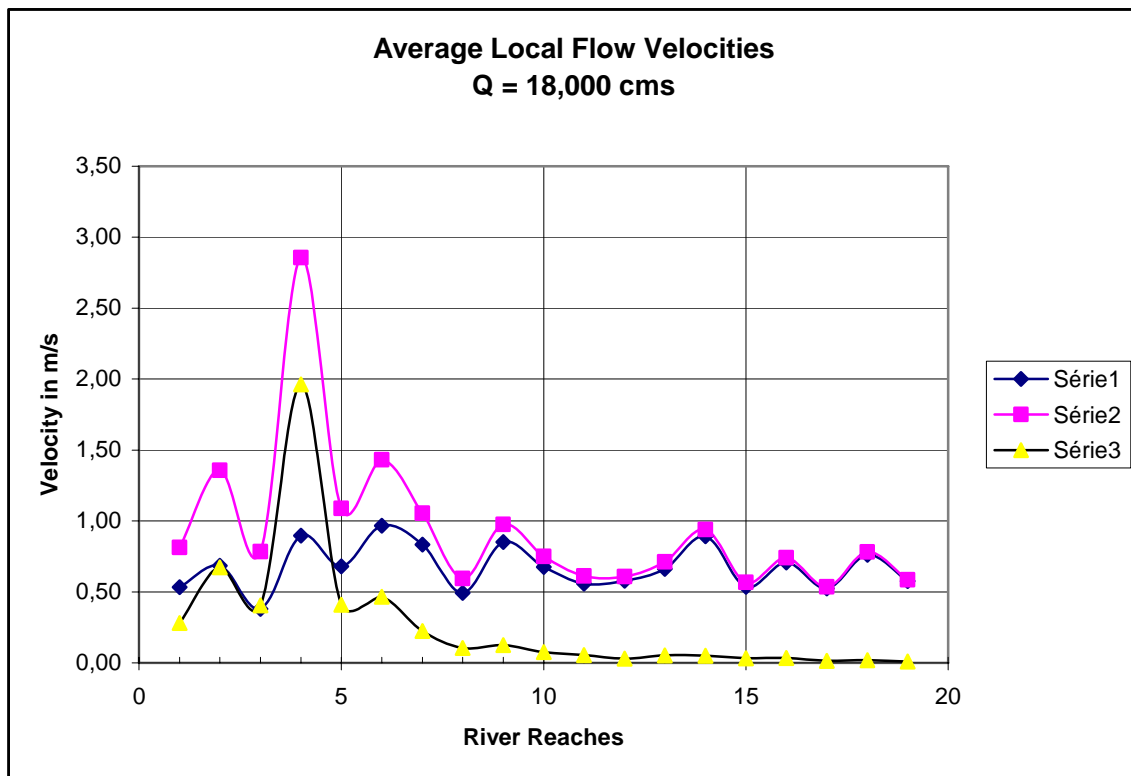


Tabela & Figura - 3

Average local flow velocities			
Q = 39,100 m ³ /s			
Sections	With Pool V (m/s)	Nat. Cdn. V (m/s)	Dimunition (m/s)
S-5	1,16	1,46	0,30
S-6	1,48	2,06	0,58
S-7	0,82	1,15	0,33
S-8	1,91	2,90	0,99
S-9	1,43	1,82	0,40
S-10	2,01	2,44	0,42
S-11	1,66	1,79	0,13
S-12	0,96	1,00	0,04
S-13	1,63	1,67	0,04
S-14	1,29	1,30	0,01
S-15	1,05	1,06	0,01
S-16	1,15	1,15	0,01
S-17	1,23	1,24	0,01
S-18	1,70	1,71	0,01
S-19	0,96	0,96	0,00
S-20	1,27	1,27	0,00
S-21	1,01	1,01	0,00
S-22	1,45	1,45	0,00
S-23	1,10	1,10	0,00

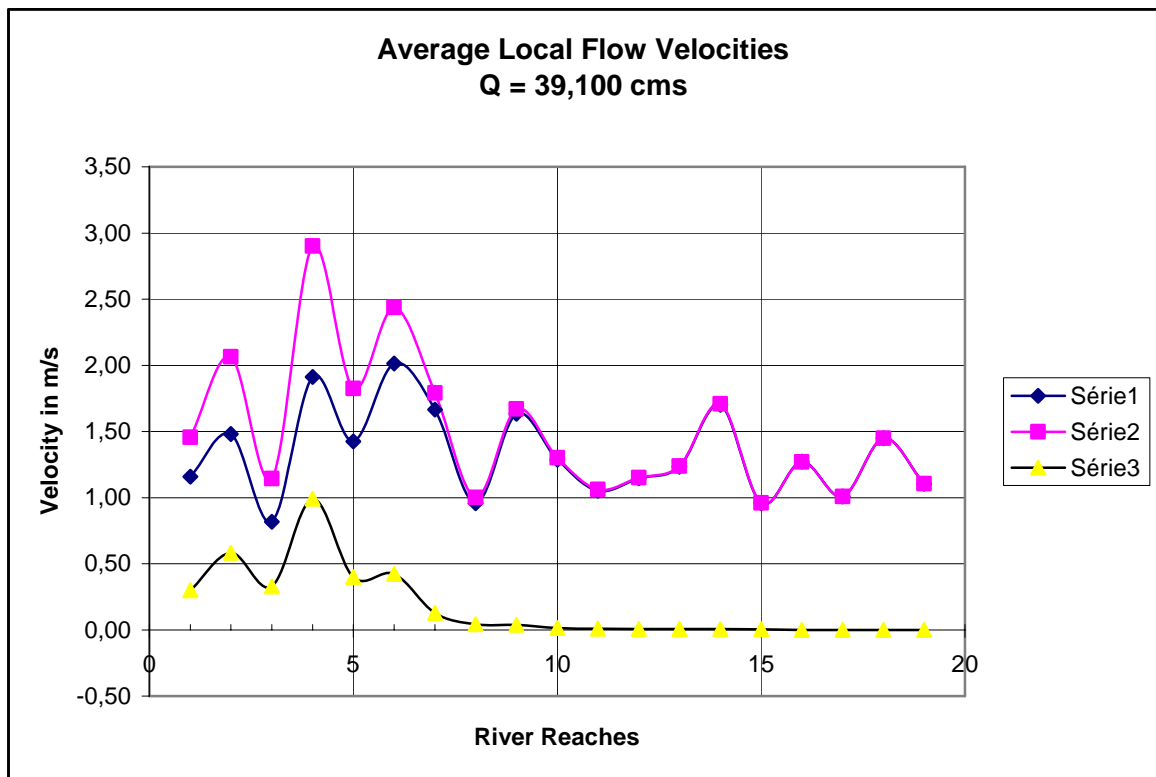


Tabela & Figura - 4

Average local flow velocities			
Q =48,600 m3/s			
Sections	With Pool V (m/s)	Nat. Cdn. V (m/s)	Dimunition (m/s)
S-5	1,44	1,71	0,27
S-6	1,84	2,34	0,50
S-7	1,01	1,29	0,28
S-8	2,35	3,32	0,97
S-9	1,75	2,08	0,33
S-10	2,45	2,80	0,35
S-11	1,98	2,08	0,10
S-12	1,12	1,16	0,04
S-13	1,90	1,95	0,04
S-14	1,49	1,52	0,03
S-15	1,22	1,24	0,02
S-16	1,36	1,38	0,01
S-17	1,43	1,45	0,02
S-18	2,00	2,02	0,02
S-19	1,11	1,11	0,00
S-20	1,48	1,48	0,00
S-21	1,20	1,20	0,00
S-22	1,72	1,72	0,00
S-23	1,32	1,32	0,00

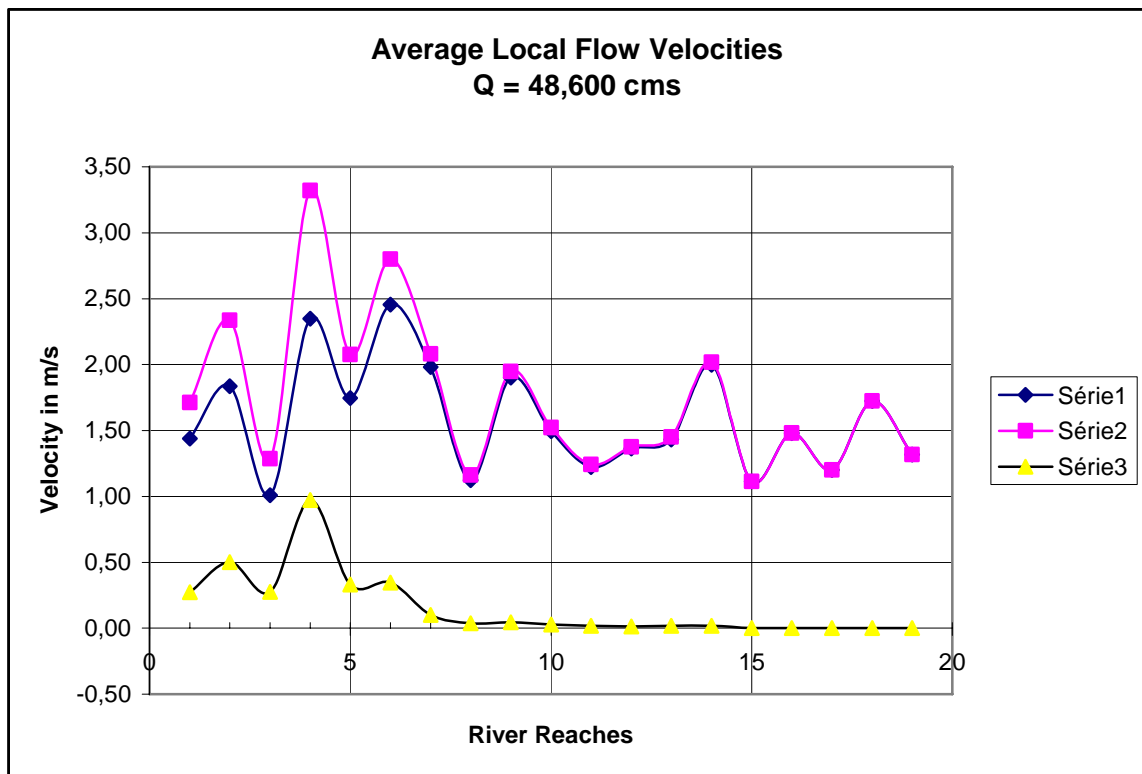


Tabela & Figura - 5

Average local flow velocities			
Q = 61,200 m ³ /s			
Sections	With Pool V (m/s)	Nat. Cdn. V (m/s)	Dimunition (m/s)
S-5	1,81	2,03	0,22
S-6	2,30	2,68	0,38
S-7	1,26	1,46	0,21
S-8	2,84	3,24	0,40
S-9	2,14	2,39	0,25
S-10	3,00	3,26	0,26
S-11	2,39	2,46	0,07
S-12	1,34	1,37	0,03
S-13	2,27	2,30	0,03
S-14	1,79	1,81	0,02
S-15	1,46	1,47	0,01
S-16	1,66	1,67	0,01
S-17	1,71	1,72	0,01
S-18	2,40	2,42	0,01
S-19	1,32	1,32	0,00
S-20	1,75	1,75	0,00
S-21	1,45	1,45	0,00
S-22	2,08	2,08	0,00
S-23	1,59	1,59	0,00

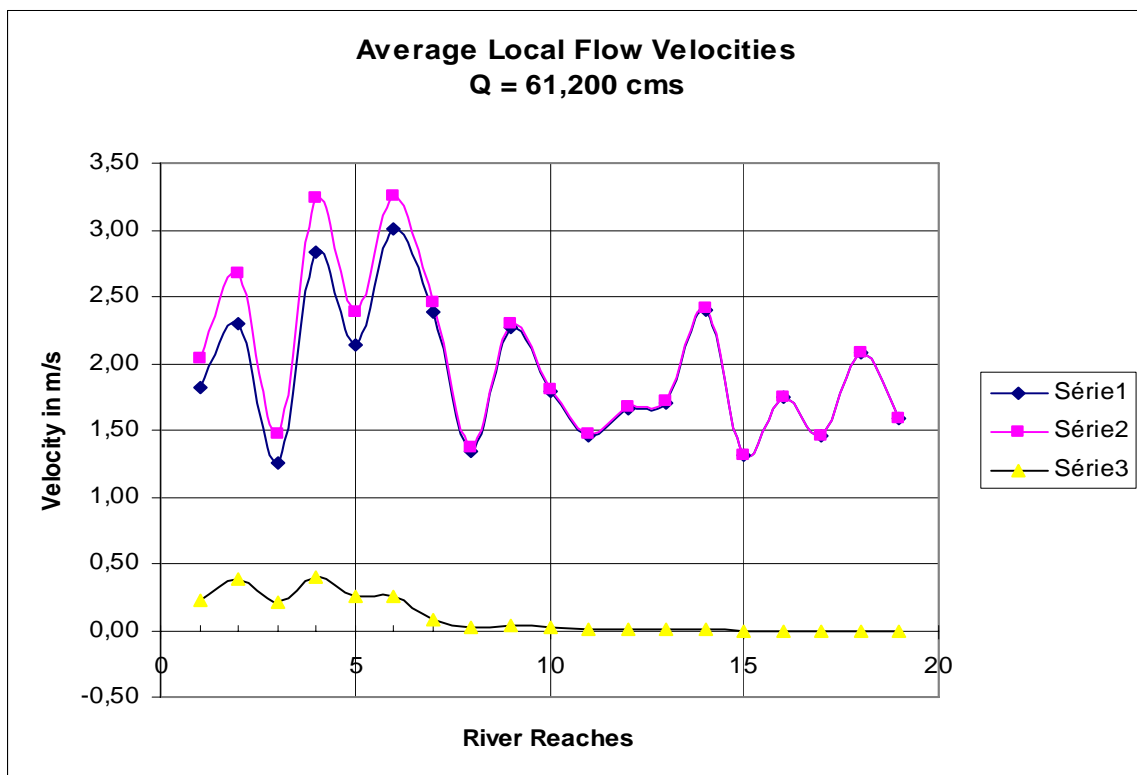


Tabela & Figura - 6

Average local flow velocities			
Q =72,600 m3/s			
Sections	With Pool V (m/s)	Nat. Cdn. V (m/s)	Dimunition (m/s)
S-5	2,15	2,31	0,15
S-6	2,71	2,97	0,26
S-7	1,48	1,61	0,14
S-8	3,33	3,75	0,42
S-9	2,47	2,63	0,16
S-10	3,46	3,63	0,17
S-11	2,70	2,77	0,07
S-12	1,53	1,54	0,01
S-13	2,58	2,60	0,01
S-14	2,04	2,04	0,00
S-15	1,67	1,67	0,00
S-16	1,92	1,92	0,00
S-17	1,95	1,95	0,00
S-18	2,76	2,76	0,00
S-19	1,48	1,48	0,00
S-20	1,98	1,98	0,00
S-21	1,67	1,67	0,00
S-22	2,38	2,38	0,00
S-23	1,83	1,83	0,00

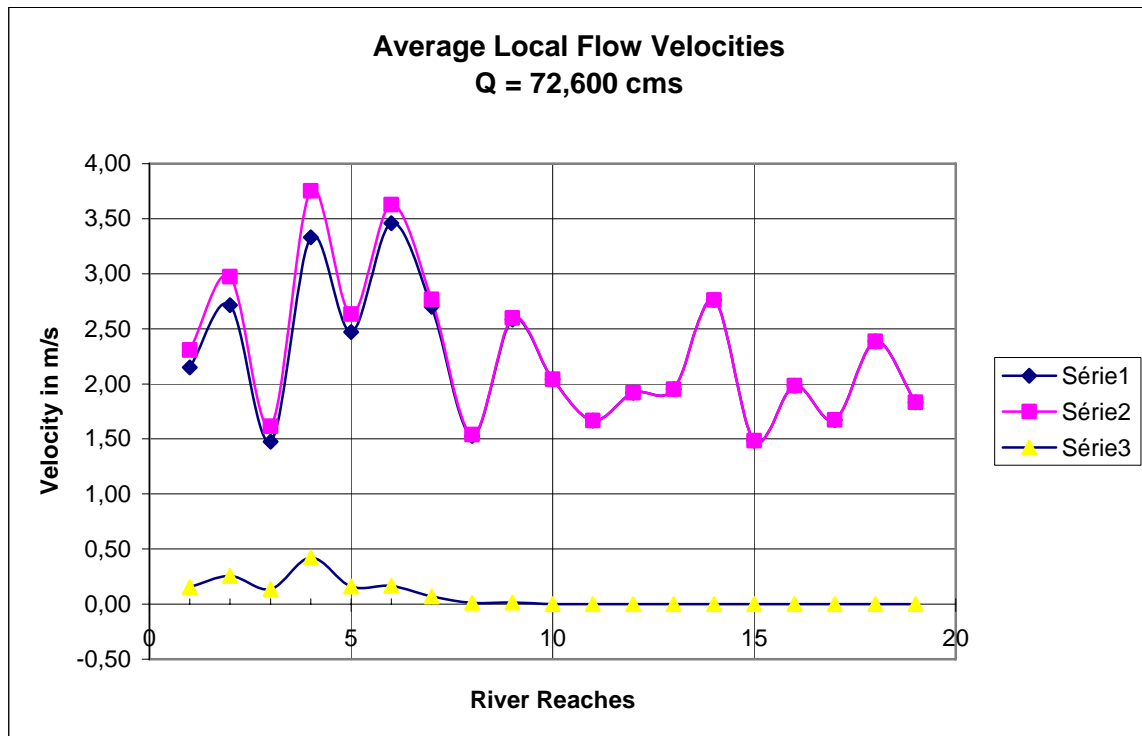


Tabela & Figura - 7

Average local flow velocities			
Q =84,000 m3/s			
Sections	With Pool V (m/s)	Nat. Cdn. V (m/s)	Dimunition (m/s)
S-5	2,49	2,57	0,08
S-6	3,12	3,25	0,13
S-7	1,69	1,76	0,07
S-8	3,81	4,03	0,22
S-9	2,78	2,87	0,09
S-10	3,88	3,99	0,11
S-11	3,04	3,07	0,03
S-12	1,69	1,71	0,02
S-13	2,87	2,90	0,03
S-14	2,28	2,28	0,00
S-15	1,86	1,86	0,00
S-16	2,17	2,17	0,00
S-17	2,18	2,18	0,00
S-18	3,10	3,10	0,00
S-19	1,65	1,65	0,00
S-20	2,21	2,21	0,00
S-21	1,88	1,88	0,00
S-22	2,68	2,68	0,00
S-23	2,06	2,06	0,00

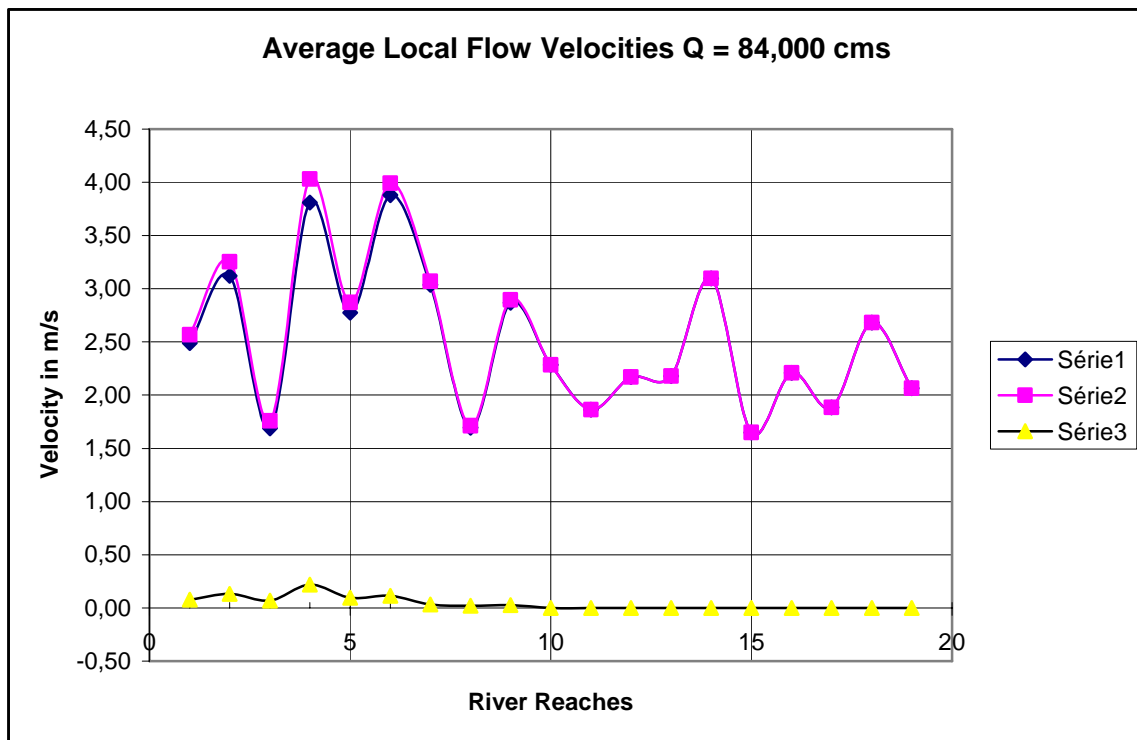


Tabela & Figura - 8

2. Análise das características de transporte de sedimento entre Jirau e Santo Antônio

A revisão de mudanças nas profundidades d'água e velocidades de fluxo no rio Madeira entre Jirau e Santo Antônio indicaram que somente cerca de 48% do comprimento da reservatório a fio d'água no trecho mais a jusante deve ser sujeito a modificações significantes na sua capacidade de transportar areia em suspensão para vazões menores que 18.000 m³/s.

O total de sedimentos transportados pelo rio Madeira é de cerca de 500 milhões de toneladas por ano (Figura 7.70), dos quais cerca de 15% são compostos de areias e cascalhos finos (ref. Tabela 7.77).

O Relatório da PCE, Furnas e Odebrecht estimou a sedimentação do reservatório a fio d'água ao longo dos anos usando o método empírico desenvolvido por Brune em 1953. Suas curvas, relacionando a eficiência de retenção e a vazão média anual entrando no reservatório (ambos em acre-pé) são mostradas na Figura 7.84. O relatório estima que no início a eficiência de retenção do reservatório a fio d'água de Santo Antônio deve ser de 19,50 % e depois de 10 anos o fundo do rio perto da barragem deve ser assoreada até a cota 59,32 m. Depois de 50 anos o nível deve ser 61,63 m e depois de 100 anos deve estabilizar na cota 61,63 m. Nós achamos que esta conclusão é muito conservadora uma vez que as velocidades de fluxo nas áreas de aproximação da casa de força e vertedouro durante a cheia anual de 40.000 m³/s, por um período de um mês e meio ou dois meses, devem ser altas suficientemente para remover as areias acumuladas durante os períodos de baixa vazão. Estes aspectos estão avaliados na parte 3 deste relatório. Também durante a verificação final do arranjo do projeto e dimensionamento das estruturas será possível avaliar os assoreamentos no fundo do reservatório a fio d'água imediatamente a montante das tomadas d'água e vertedouro. Se necessário, mudanças no arranjo das estruturas para produzir o mínimo de deposição de sedimento nesta área podem ser desenvolvidas no modelo hidráulico reduzido.

Em grandes reservatórios pode ser assumido que a eficiência de retenção de sedimentos seria 100%, que significa que todos os sedimentos entrando no reservatório ficam retidos.

Em reservatórios pequenos, às vezes a maior parte dos sedimentos pode ser transportada ao longo do mesmo. Isto pode também acontecer durante períodos de altas vazões quando a água do reservatório está sendo descarregada pelo vertedouro e existe alta velocidade de fluxo no reservatório. A proporção de sedimento passando pelo reservatório depende basicamente de dois fatores: a velocidade média do fluxo pelo reservatório e as características do sedimento. Com respeito a este último, sedimentos finos (os tamanhos de silte e argila) podem ficar em suspensão por tempo suficiente para passar pelo reservatório. Os tamanhos de areia não devem passar pelo reservatório.

Verificações preliminares (ref. Tabelas e Figuras 1 a 8) indicam que, para o projeto Santo Antônio, em quase todo o tempo as velocidades de fluxo do rio e a turbulência do reservatório a

fio d'água devem ser suficientemente altas para manter as frações de silte e argila dos sedimentos em suspensão. Assim, não haverá deposição a não ser em áreas com águas totalmente paradas.

Durante nossa visita ao sítio, vimos (fotos 1, 2 e 3) que todo tipo de vegetação, lianas, matos e pequenos arbustos estavam crescendo nos bancos de areia, como na ilha de Tarumã. Nós não temos idéia sobre quanto tempo passou para estas plantas atingirem alturas de 2 a 3 m. Com o reservatório a fio d'água é possível que, em certas áreas (mais nas áreas de água rasa e ao longo das margens do rio), a deposição das areias intermitentes possa facilitar o crescimento destes tipos de vegetação. O impacto, ao longo do tempo, desta vegetação, deve causar alguma redução na seção de escoamento e aumento do coeficiente de rugosidade ao longo da margem. Em longos períodos este fenômeno pode ser compensado pela erosão das margens. Durante nossa visita ao sítio vimos escorregamentos em ambas as margens (Foto 8), além de erosão nas ilhas de areia (Foto 10).

Como a morfologia do reservatório a fio d'água de Santo Antônio é quase toda contida dentro do leito do rio original (1), ele não é um reservatório grande e as velocidades de fluxo após o fechamento são relativamente altas durante todas as condições de vazão.

- (1) Para estudar com mais precisão as velocidades de fluxo e características do transporte dos sedimentos nas áreas submersas do reservatório a fio d'água, seria necessário levantar as reais seções de fluxo no reservatório a fio d'água antes do enchimento.

Como Santo Antonio é um projeto de baixa queda, a perda do volume do armazenagem não é um parâmetro significativo, particularmente devido à presença de afloramentos de rocha, a deposição de areia deve aumentar em certas áreas onde hoje vemos bancos de areia e ilhas. Assim nos parece que no lugar de tentar determinar a eficiência de retenção de sedimentos usando a relação desenvolvida por Brune, seria mais representativo analisar as características de transporte de sedimentos ao longo do reservatório a fio d'água.

Para estudar as importantes mudanças nos parâmetros hidráulicos nas características de transporte de areia ao longo do comprimento do rio, 18 trechos (RR) foram considerados entre seções 5 a 23 (ref: Figura 7.51) conforme o seguinte:

RR 1 – Secções 6 a 5. RR 2 – Secções 7 a 6. RR 3 – Secções 8 a 7. RR 4 – Secções 9 a 8.
RR 5 – Secções 10 a 9. RR 6 – Secções 11 a 10. RR 7 – Secções 12 a 11. RR 8 – Secções 13 a 12. RR 9 – Secções 14 a 13. RR 10 – Secções 15 a 14. RR 11 – Secções 16 a 15. RR 12 – Secções 17 a 16. RR 13 – Secções 18 a 17. RR 14 – Secções 19 a 18. RR 15 – Secções 20 a 19. RR 16 – Secções 21 a 20. RR 17 – Secções 22 a 21. RR 18 – Secções 23 a 22.

O gráfico da distribuição da carga de sedimento suspenso desenvolvido por Hunter Rouse (ref: Sedimentation Engineering-ASCE -Manuals and reports on engineering practice) foi usado para estudar o transporte de areia ao longo do reservatório a fio d'água.

Conhecendo a velocidade de cisalhamento local u^* que é função de $(gdi)^{0,5}$

Onde: g = aceleração de gravidade

d = profundidade do fluxo

i = inclinação da superfície d'água ou gradiente de energia do fluxo do rio.

E a velocidade de queda w de um determinado tamanho do grão de areia, é possível determinar a razão w/u^* que define a distribuição vertical do grão de areia em movimento no fluxo turbulento.

Os seguintes procedimentos foram usados para determinar a profundidade de fluxo e a inclinação da superfície d'água: Para um determinado trecho, a profundidade de fluxo d foi aquela localizada no extremo de montante e a inclinação da superfície d'água foi obtida dividindo a diferença das profundidades d'água nos extremos de montante e de jusante pelo comprimento do trecho (2).

- (2) Parece que os níveis d'água indicados para seção 8 para as condições naturais e com o reservatório a fio d'água estão influenciados pelas velocidades de fluxo sobre o salto de Teotônio (ref: Tabela 7.54 e Tabela 7.60) assim criando uma subestimação das inclinações da superfície d'água (algumas vezes negativas) entre seções 8 e 7, que impacta a capacidade de transporte de areia localmente como freqüentemente é aparente nos valores de w/u^* .

A figura 2.1 mostra a distribuição relativa da carga em suspensão como desenvolvida por Rouse. Para $w/u^*=0,06$ a distribuição é quase vertical sobre toda a profundidade de fluxo. Para $w/u^*=2$ o grão está ainda em suspensão, mas somente sobre 30% da profundidade de fluxo. Para $w/u^*=4$ nós assumimos que o grão é quase inerte.

Os cálculos apresentados neste relatório são aproximados porque os dados das larguras efetivas do rio e do reservatório a fio d'água, profundidades hidráulicas e inclinações das superfícies d'água, derivadas de informações do relatório e usadas nos cálculos para as condições existentes e com o reservatório a fio d'água, são aproximados (ref: tabelas 7.54, 7.60 e Figuras 7.55). Entretanto, os resultados podem ainda ser considerados válidos para a presente revisão. **Eventualmente estes cálculos podem ser revistos com dados mais precisos sobre larguras do canal, profundidades de fluxo, seções de fluxo a cada seção de referência e inclinações de superfície d'água entre seções.**

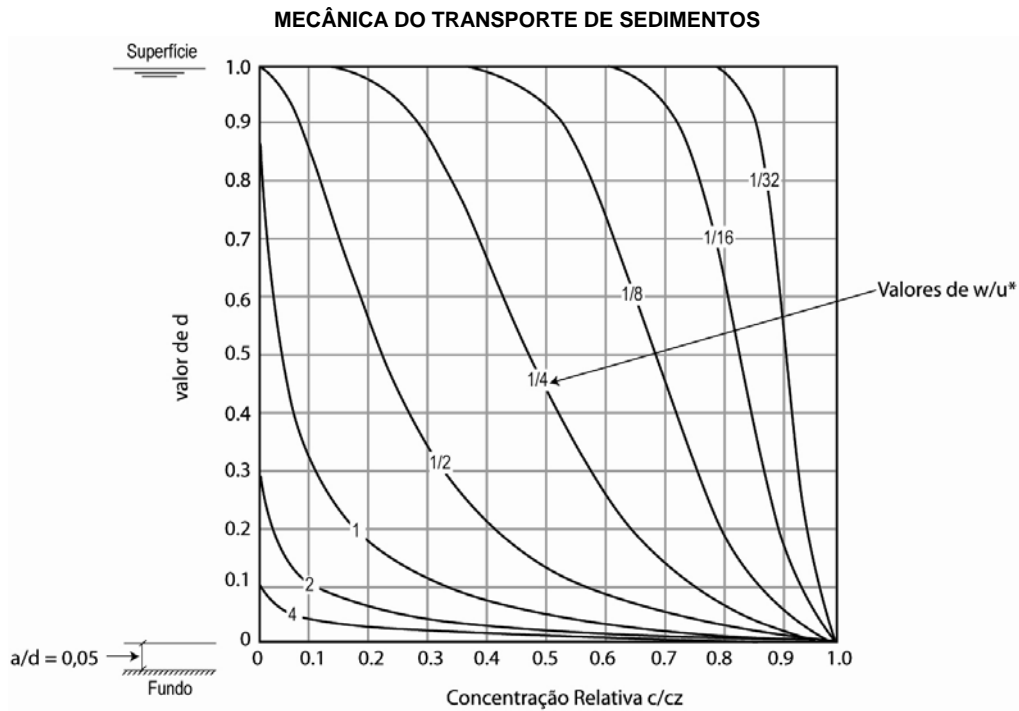


Figura 21- Gráfico de Rouse com Equação da Distribuição da Carga Suspensa sedimentar para a/d 0,05 e vários valores de z .

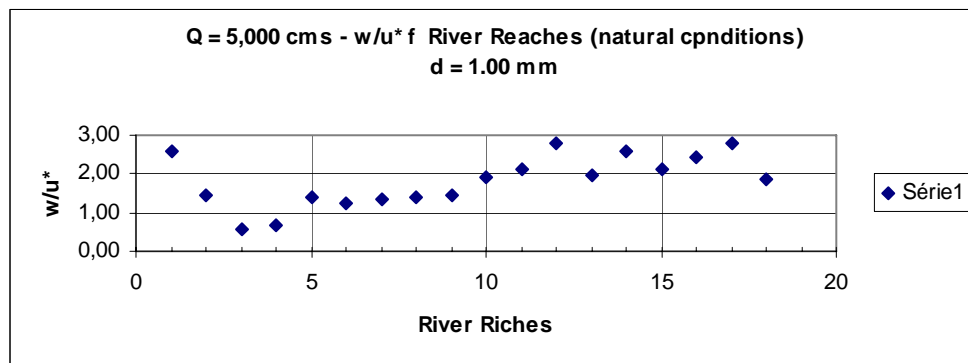
2.1 Características de transporte de sedimentos com condições naturais para as seguintes vazões do rio: 5.000; 10.000; 18.000; 39.000; 40.000; 61.200; 72.600 e 84.000 m^3/s .

As tabelas mostram os valores de w/u^* para cada trecho do rio e para vários tamanhos de grãos de areia e vazões com as condições naturais do rio como mostrados em Apêndices I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII.

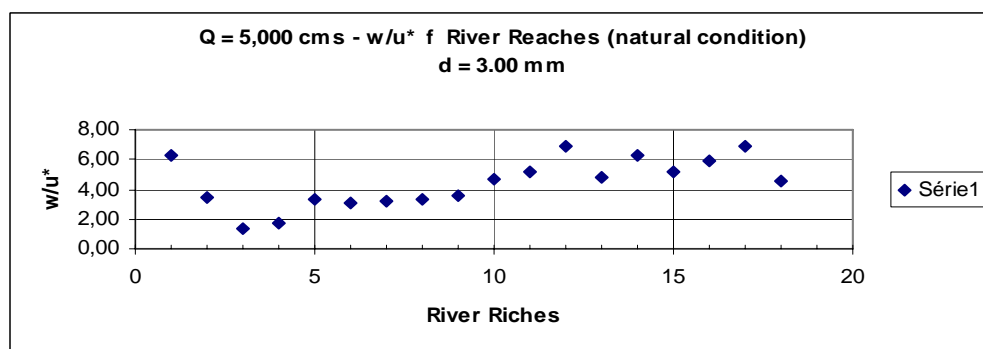
Análises das características de transporte para dois tamanhos de grãos críticos 1,00 mm e 3,00 mm e para cada vazão de referência são dados abaixo. As tabelas anexadas dão as características de transporte de areia para outros tamanhos de grão.

I – $Q = 5.000 \text{ m}^3/\text{s}$

Grãos de 1,00 mm são transportados principalmente em suspensão a jusante de RR 10 e em saltitação entre RR 11 e RR 18.

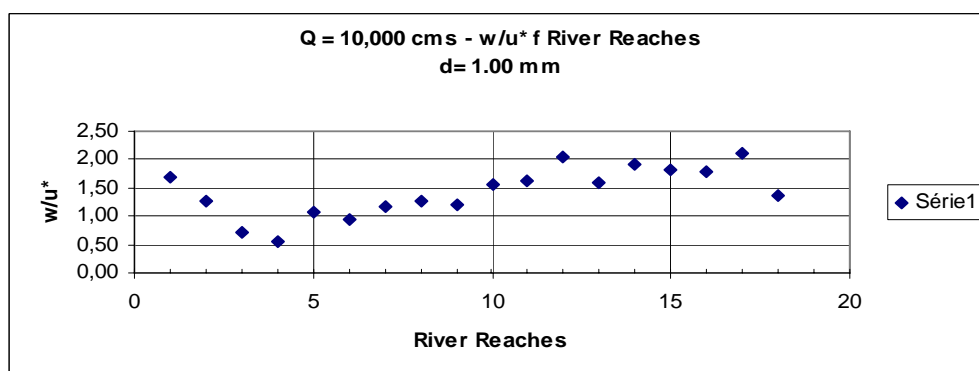


Grãos de 3,00 mm de diâmetro são transportados em saltitação a jusante de RR 10 (com a exceção de RR 1). Para os trechos a montante de RR 10, todos os grãos de 3,00mm de diâmetro estão completamente inertes.

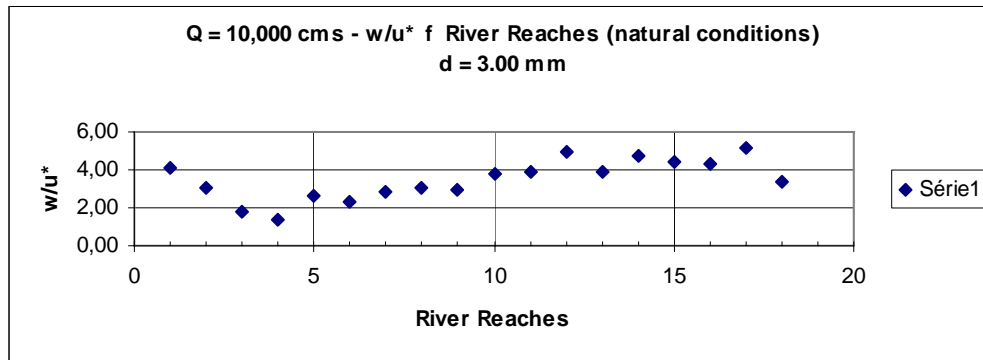


II – $Q = 10.000 \text{ m}^3/\text{s}$

Grãos de 1,00 mm são transportados em suspensão sobre todo o comprimento rio entre RR 1 e RR 18.

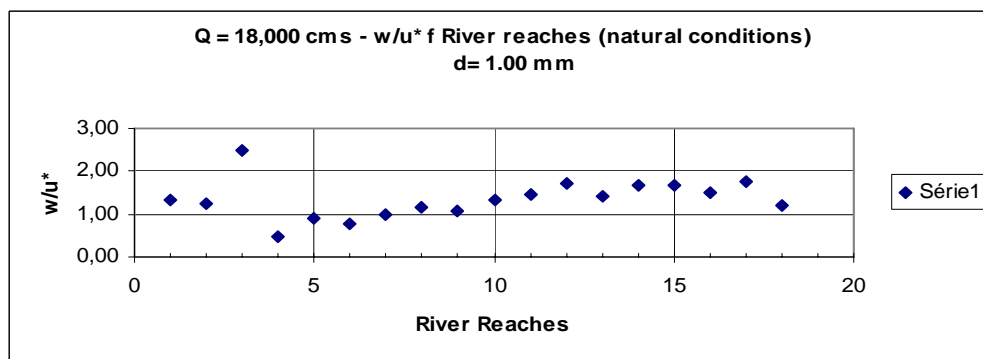


Grãos de 3,00 mm entre RR 1 and 10 estão se movimentando em saltitação e suspensão, e acima de RR 10 estão inertes. Na última secção RR 18 há algum movimento em saltitação.



III – Q = 18.000m³/s

Grãos de 1,0 mm são transportados em suspensão ao longo de todo o comprimento do rio entre RR 1 and RR 18.



Grãos de 3,00 mm estão movendo-se em suspensão e saltitação ao longo de todo o comprimento de rio entre as secções RR 1 to RR 18, com exceção em RR 3 onde eles estão inertes.

Entretanto, nós achamos que a régua 8 localizada imediatamente a jusante do Salto Teotônio (foto __) é afetada fortemente pelo rebaixamento devido à queda da velocidade local, pelo menos na ordem de 1,0 m e é causada por esta anomalia. Este fato é evidente pelas leituras de régua que são constantemente baixas ou, às vezes, inferiores às leituras da próxima régua 7 a jusante (ref: Tabela 7.54). Se nós acrescentarmos 1,0 m ao nível d'água, o valor de w/u* seria 2,18 no lugar de 6,03. Assim, os valores de w/u* em todas as tabelas para RR 3 podem ser menores, em especial para vazões baixas.

Figura correspondente ao nível d'água da Tabela 7.54

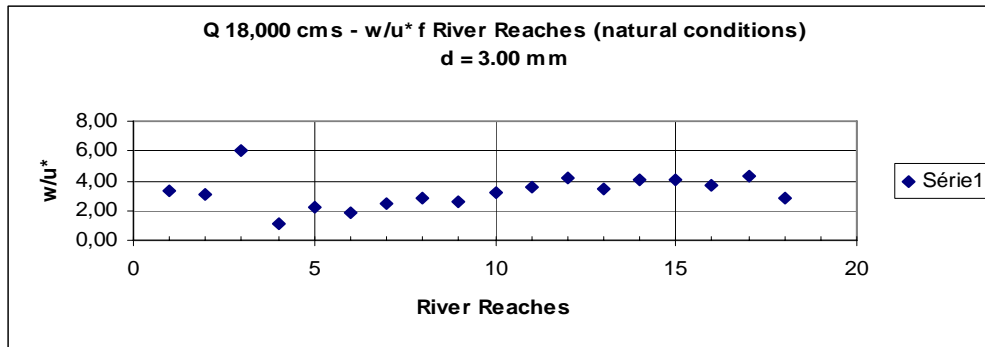
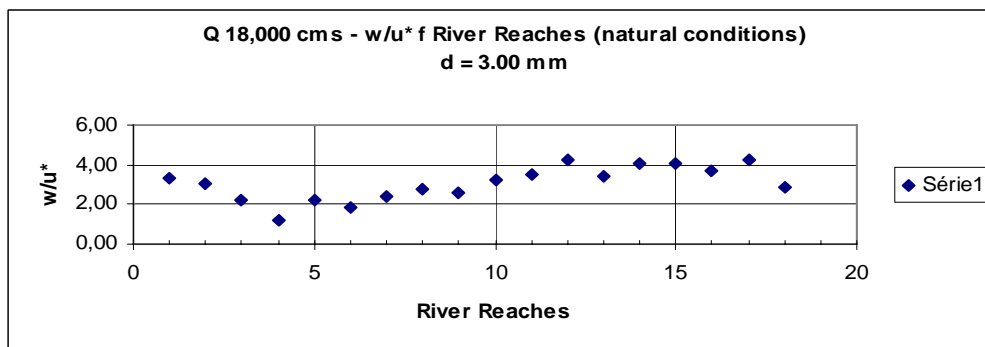
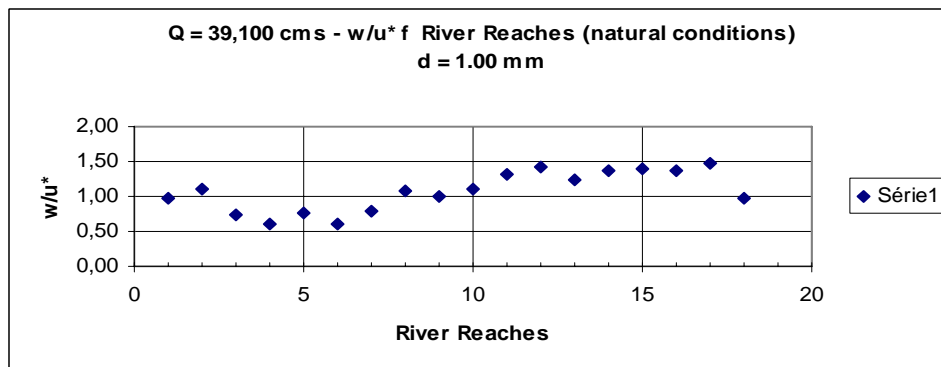


Figura correspondente ao nível d'água da Tabela 7.54 + 1,0m

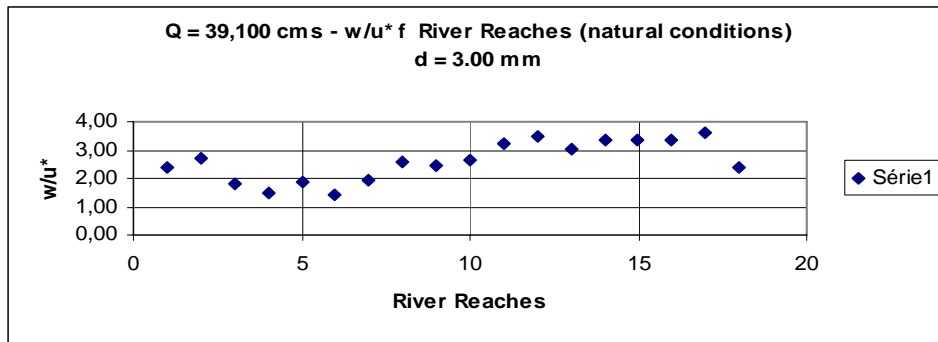


IV – Q = 39.100m³/s

Grãos de 1,00 mm são transportados em suspensão ao longo de todo o comprimento do rio entre RR 1 e RR 18.

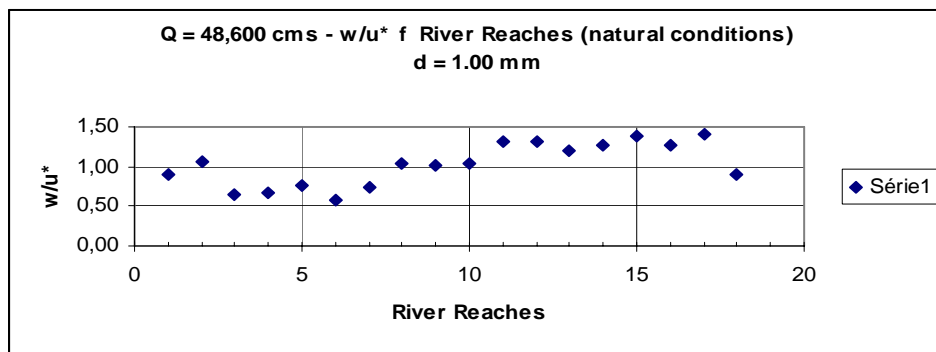


Grãos de 3,00 mm são transportados em saltitação em todos os trechos do rio com exceção entre RR 3 e RR 7 onde eles estão se movendo em suspensão.

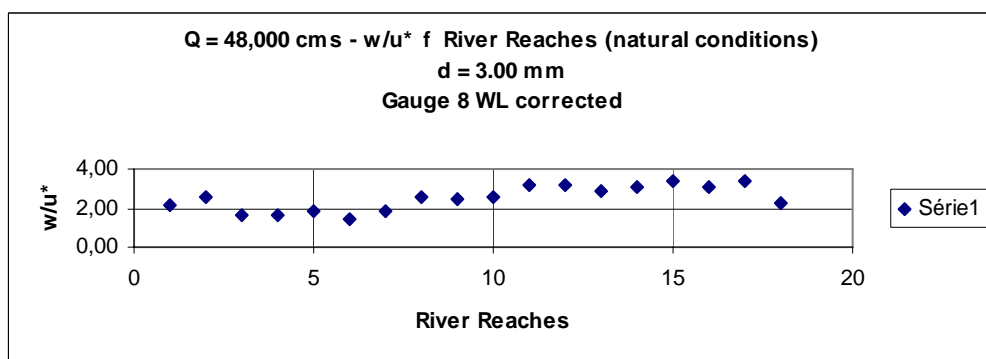


V - Q = 48.600m³/s

Grãos de 1.00mm são transportados em suspensão ao longo de todo o comprimento do rio entre RR 1 eRR 18.

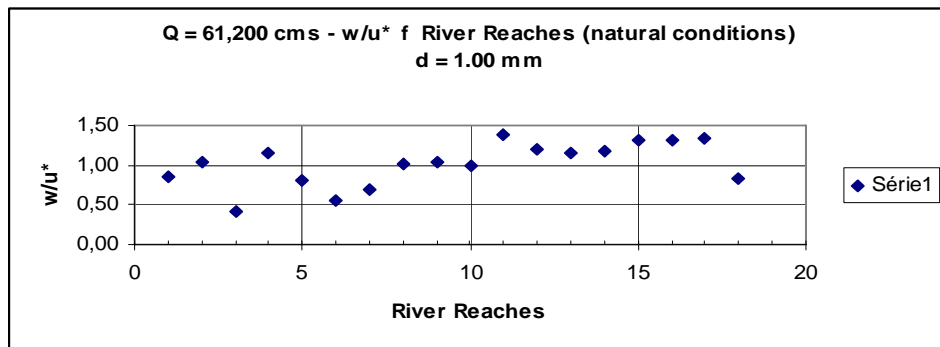


Grãos de 3,00 mm são transportados em suspensão até RR 7 e em saltitação até RR 18.

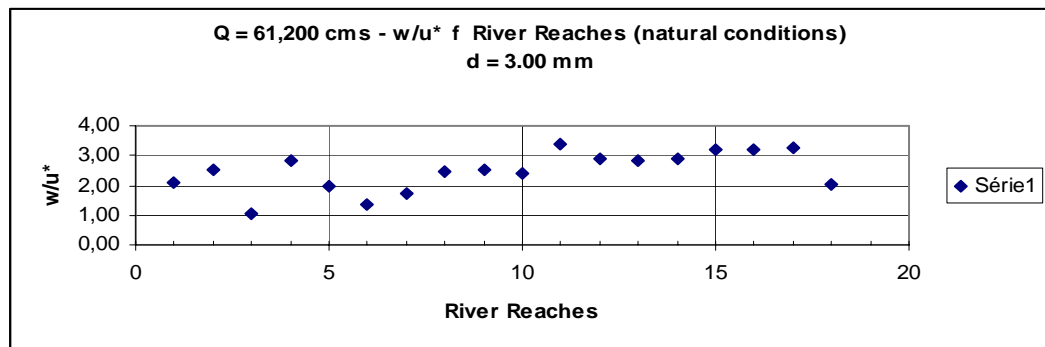


VI – $Q = 61.200\text{m}^3/\text{s}$

Grãos de 1,00mm são transportados em suspensão ao longo de todo o comprimento do rio entre RR 1 e RR 18.

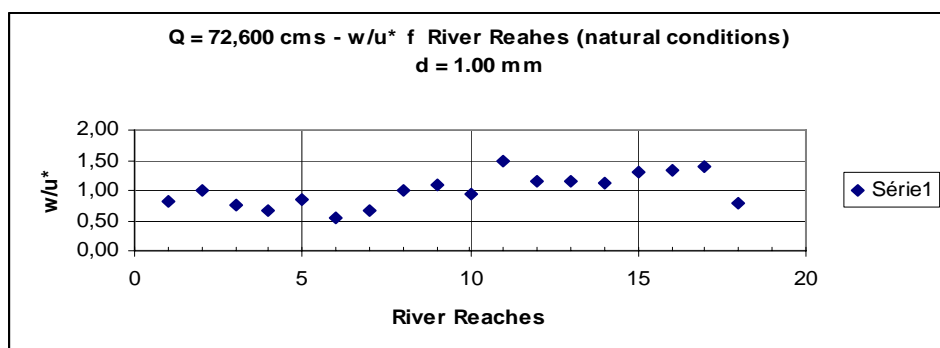


Grãos de 3,00 mm são transportados em saltação em todos os trechos do rio exceto entre RR 3 e RR 7 e em RR 18 onde eles estão se movendo em suspensão.

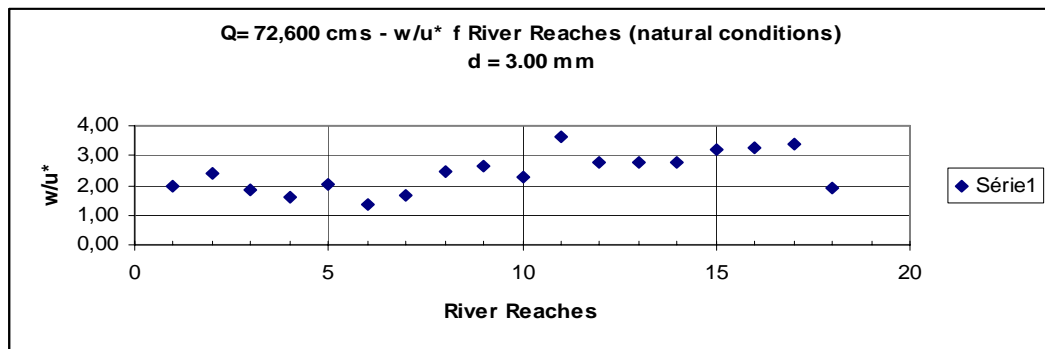


VII – $Q = 72.600\text{m}^3/\text{s}$

Grãos de 1,00mm são transportados em suspensão ao longo de todo o comprimento do rio entre RR 1 e RR 18.

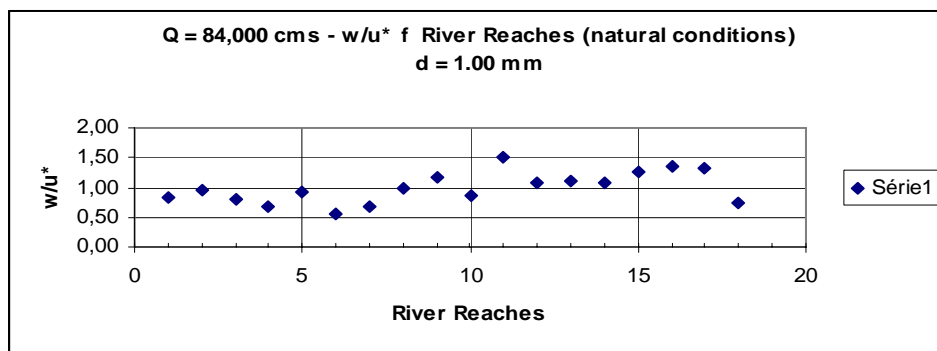


Grãos de 3,00 mm são transportados em saltitação em todos os trechos do rio exceto entre RR 1 e RR 7 e em RR 18 onde eles estão se movendo em suspensão.

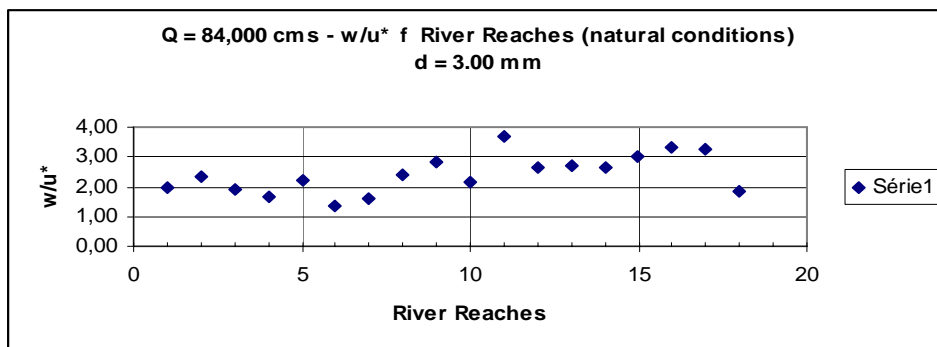


VIII – Q = 84.000m³/s

Grãos de 1,00 mm são transportados em suspensão ao longo de todo o comprimento do rio entre RR 1 e RR 18.



Grãos de 3,00 mm são transportados em saltitação em todos os trechos do rio exceto entre RR 3 e RR 7 e em RR 18 onde eles estão se movendo em suspensão.



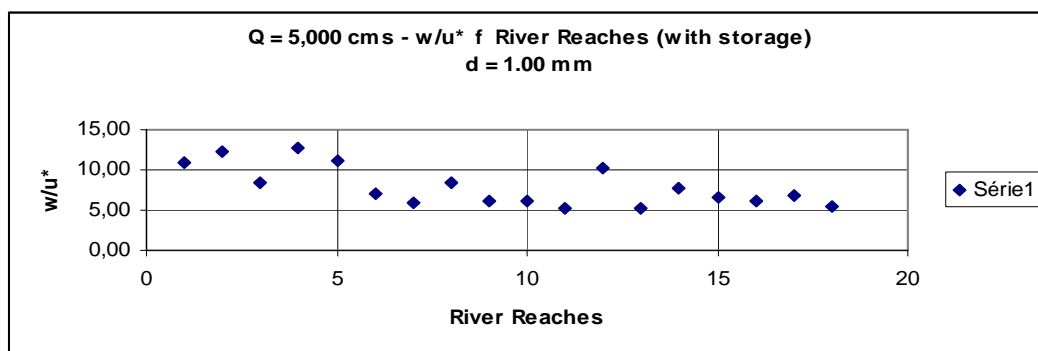
2.2 Características de transporte de sedimentos com o reservatório a fio d'água de AHE Santo Antônio para as seguintes vazões do rio: 5.000; 10.000; 18.000; 39.100; 48.600; 61.200; 72.600 e 84.000 m³/s.

Como explicado anteriormente, com o reservatório a fio d'água, o efeito do remanso vai até Jirau com vazões do rio de 5.000 e 10.000 m³/s. Com maiores vazões do rio, o reservatório a fio d'água deve recuar por apenas 60 km do total de 125 km ou cerca de 48% do comprimento do reservatório a fio d'água. O incremento na profundidade e velocidade de fluxos reduzidos neste trecho do reservatório a fio d'água deve afetar a capacidade de transporte de sedimentos. Em certas áreas, as ilhas existentes e os canais do rio devem sofrer assoreamento para vazões até 18.000 m³/s. Para vazões de 39.100 m³/s ou mais, o transporte de areia deve ser generalizado e todos os tamanhos dos grãos deve iniciar e uma parte de depósitos anteriores deve ser erodida. As Tabelas mostrando os valores de w/u^* para cada trecho do rio e vários tamanhos dos grãos e vazões com o reservatório a fio d'água estão mostradas nos Apêndices IA, IIA, IIIA, IVA, VA, VIA, VII, VIIIA.

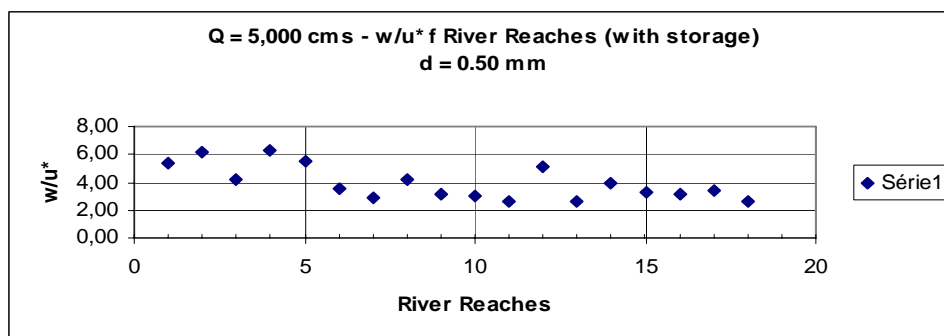
Análises das características de transporte para tamanhos de grãos críticos para cada vazão de referência estão indicadas abaixo.

IA – Q = 5.000m³/s

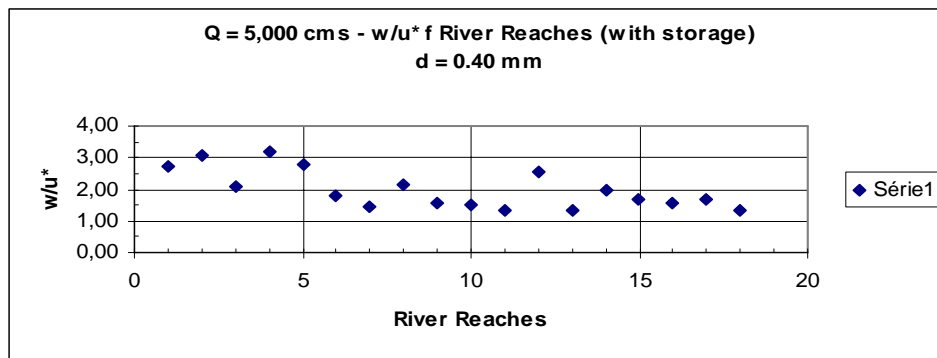
Grãos de 1,00 mm estão completamente inertes ao longo de todo o comprimento do reservatório a fio d'água entre RR1 to RR 18.



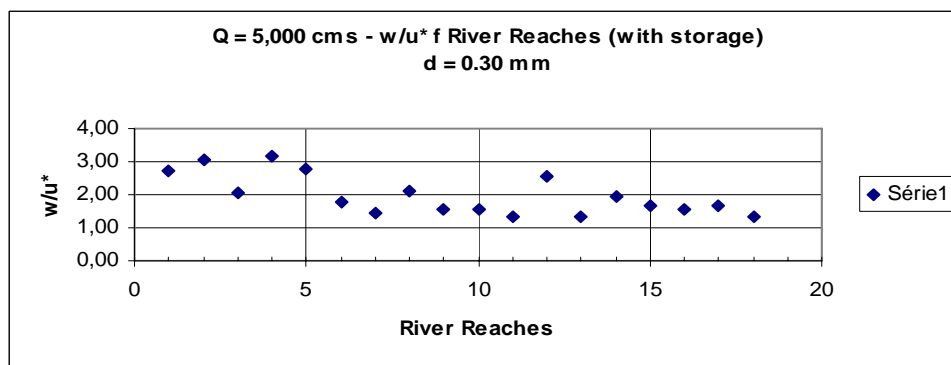
Grãos de 0.50 mm estão completamente inertes entre RR 1 e RR 5 e se movendo principalmente em saltitação a montante de RR 6.



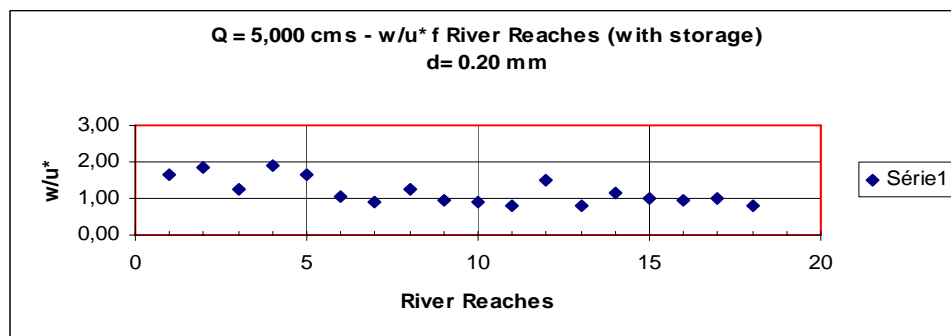
Grãos de 0,40 mm estão se movendo in saltitação entre RR 1 e RR 5 e mais a montante eles estão sendo transportados em suspensão.



Grãos de 0,30 mm estão se movendo em saltitação até RR 5, mais a montante eles estão se movendo em suspensão ao longo do comprimento restante do reservatório a fio d'água.

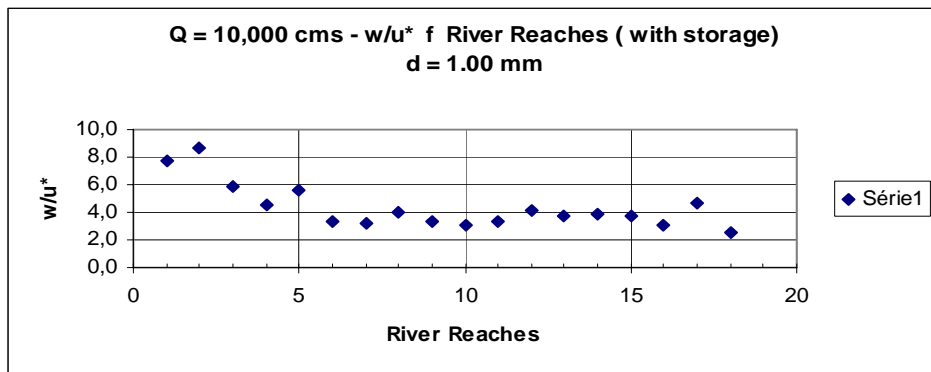


Grãos de 0,20 mm estão se movendo em suspensão ao longo de todo o comprimento do reservatório a fio d'água.

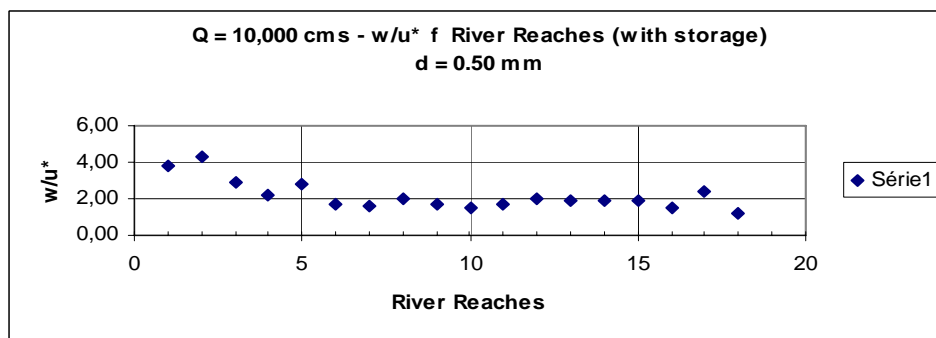


IIA - $Q = 10.000 \text{ m}^3/\text{s}$

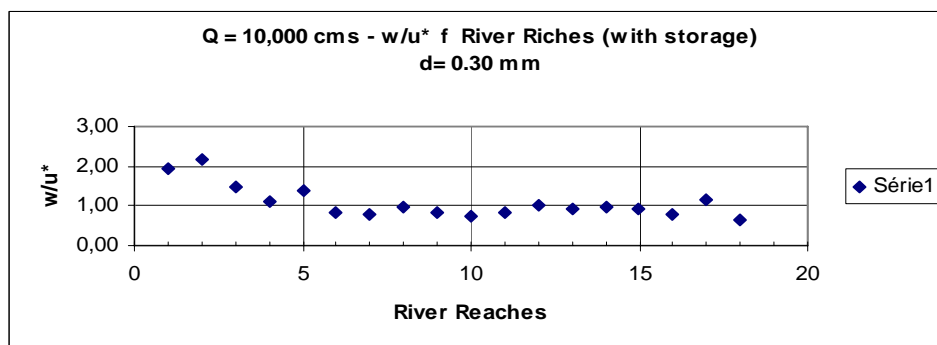
Grãos de 1,00 mm estão completamente inertes entre RR 1 e RR 5, mais a montante eles estão se movendo em saltitação.



Grãos de 0,50 mm estão se movendo em saltitação até a secção 10, mais a montante eles estão sendo transportados em suspensão.

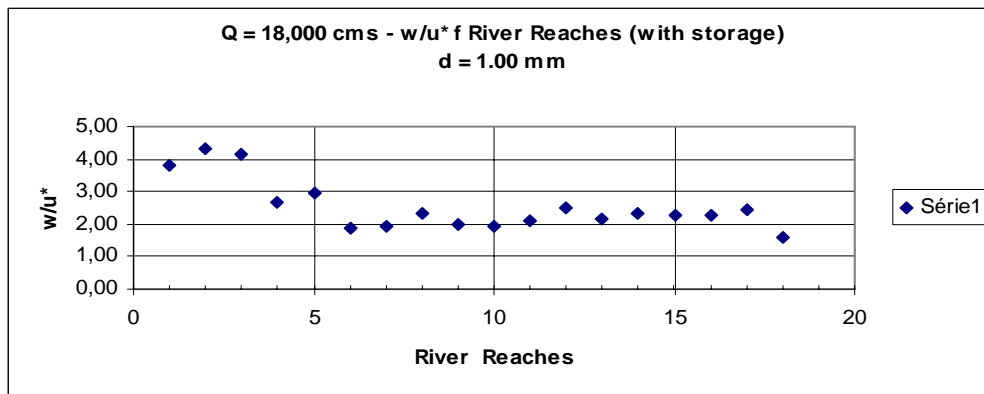


Grãos de 0,03 mm são transportados em suspensão ao longo de todo o comprimento do reservatório a fio d'água.

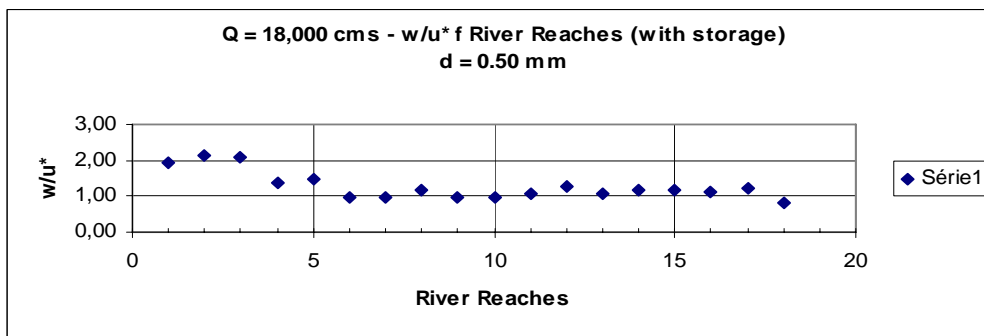


IIIA - $Q = 18.000 \text{ m}^3/\text{s}$

Grãos de 1,00 mm estão se movendo em saltitação entre as secções 6 e 10, mais a montante eles estão sendo transportados em suspensão.

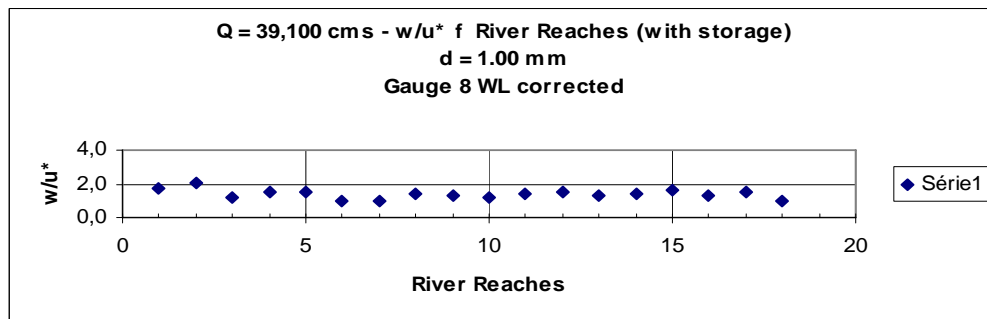


Grãos de 0,50 mm são transportados em suspensão ao longo de todo o comprimento do reservatório a fio d'água.

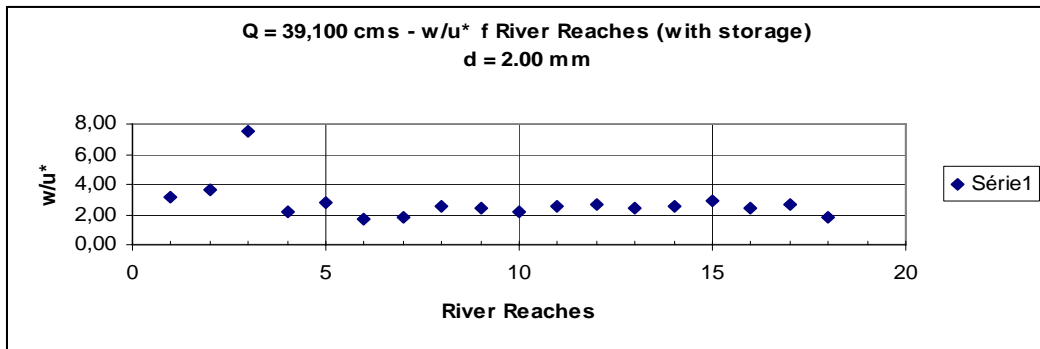


IVA - $Q = 39.100 \text{ m}^3/\text{s}$

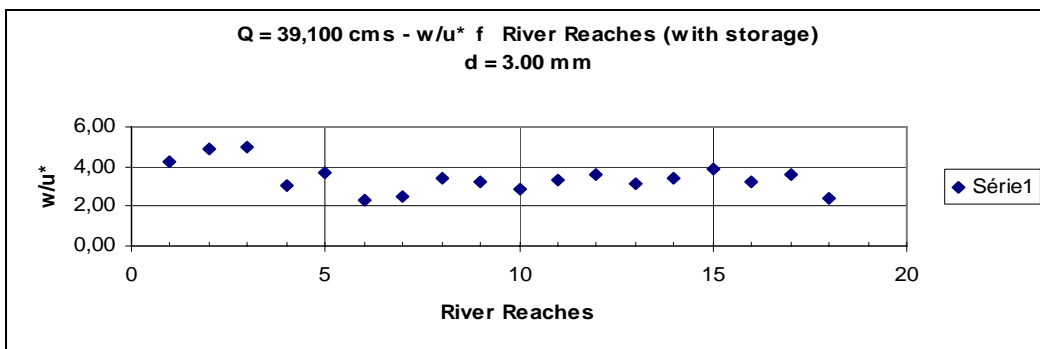
Grãos de 1,00 mm são transportados em suspensão ao longo de todo o reservatório a fio d'água.



Grãos de 2,00 mm estão se movendo quase em suspensão ao longo de todo o reservatório a fio d'água.

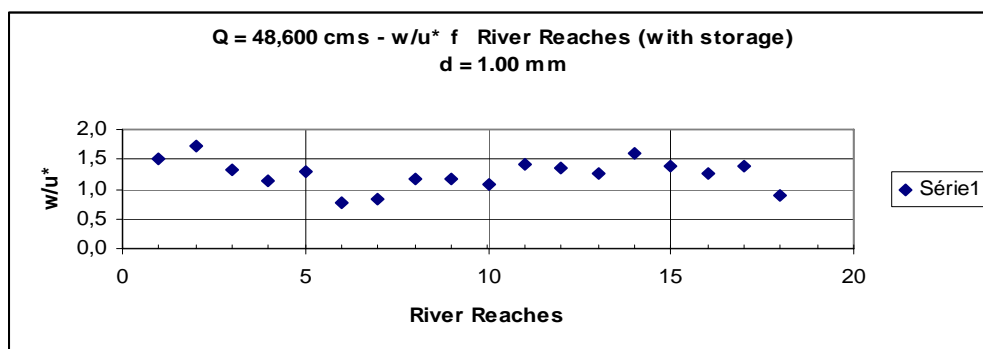


Grãos de 3,00 estão inertes até RR 3, mais a montante eles estão se movendo em saltitação.

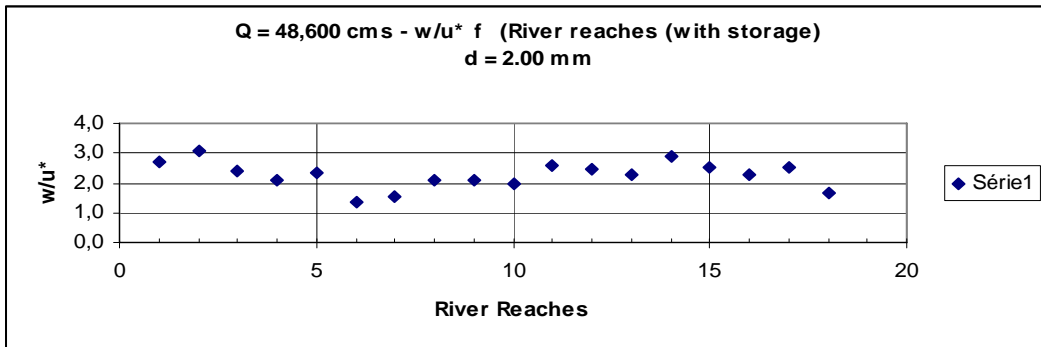


VA - Q = 48.600 m³/s

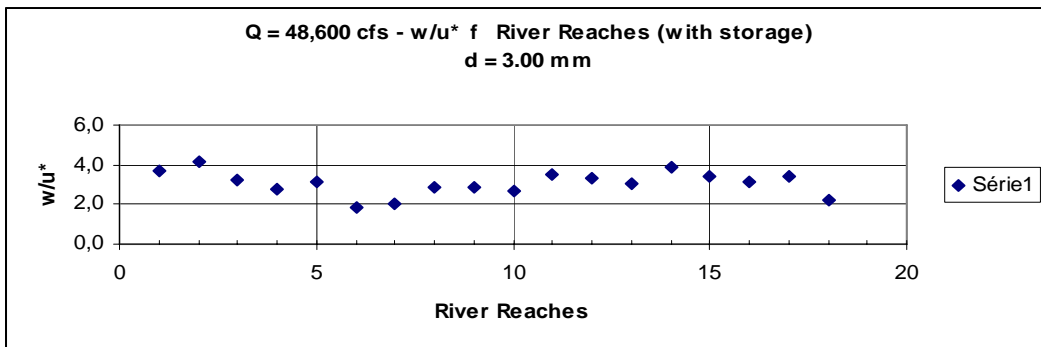
Grãos de 1,00 mm são transportados em suspensão ao longo de todo o reservatório a fio d'água.



Grãos de 2,00 mm estão se movendo principalmente em saltitação entre RR 1e RR 5 e em suspensão entre RR 6 e RR 10, seguindo em saltitação entre RR 11 e RR 17 e em suspensão em RR 18. Estes fatos são indicativos da natureza muito complexa e intermitente do movimento da areia.

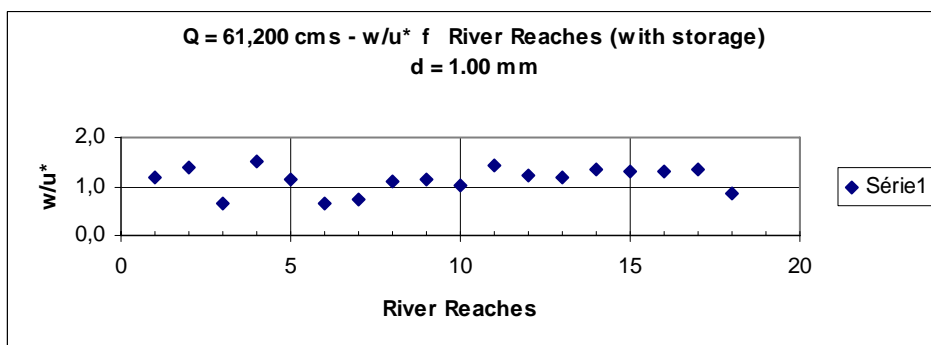


Grãos de 3,00 mm estão se movendo de forma geral em saltitação ao longo de todo o reservatório a fio d'água.

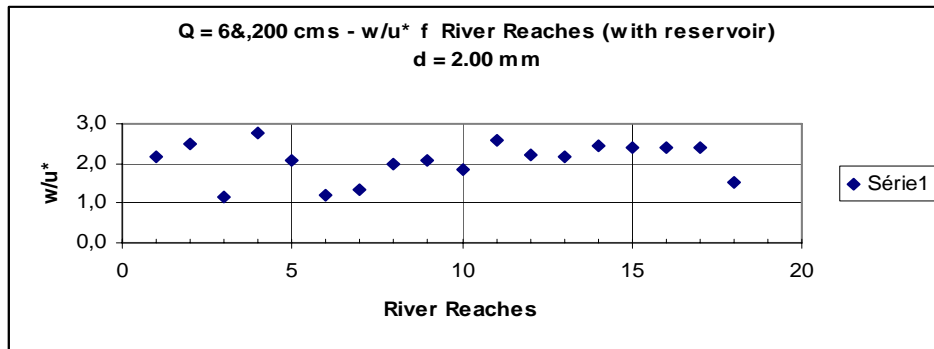


VIA – Q = 61.200 m/s

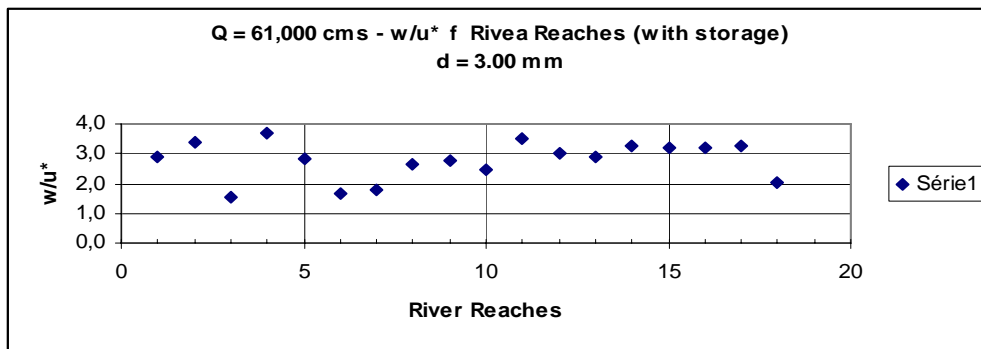
Grãos de 1,00 mm estão sendo transportados em suspensão ao longo de todo o reservatório a fio d'água.



Grãos de 2,00 mm estão se movendo de forma geral em saltitação e, em certas áreas, estão sendo transportados em suspensão.

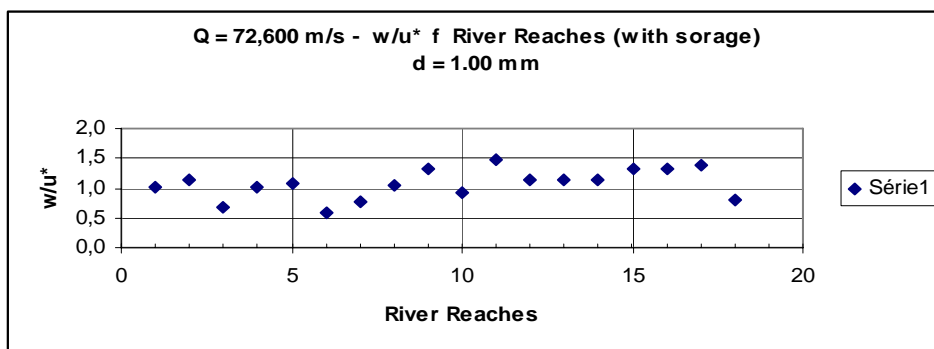


Grãos de 3,00 mm estão se movendo em saltitação e, em certas áreas, estão sendo transportados em suspensão.

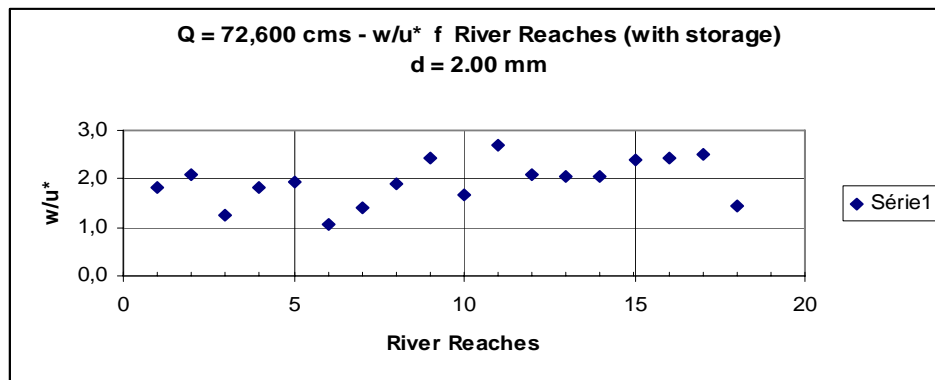


VIIA – Q = 72.600 m/s

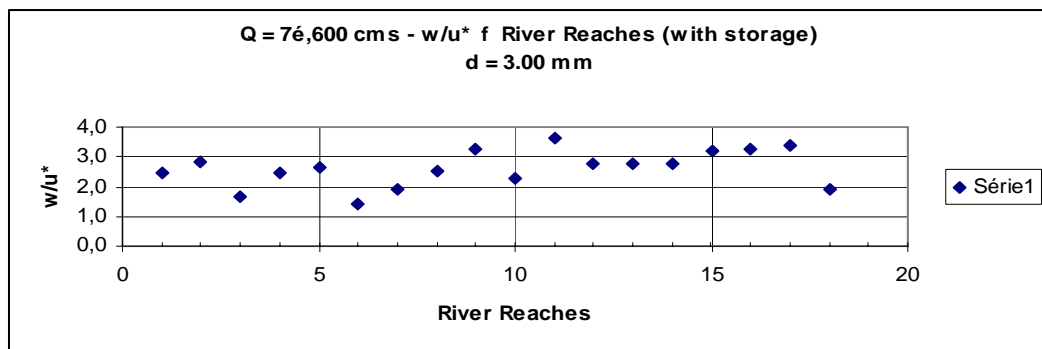
Grãos de 1,0 mm estão sendo transportados em suspensão ao longo de todo o comprimento do reservatório a fio d'água.



Grãos de 2,00 mm estão sendo transportados principalmente em suspensão e, em certos trechos, em saltitação.

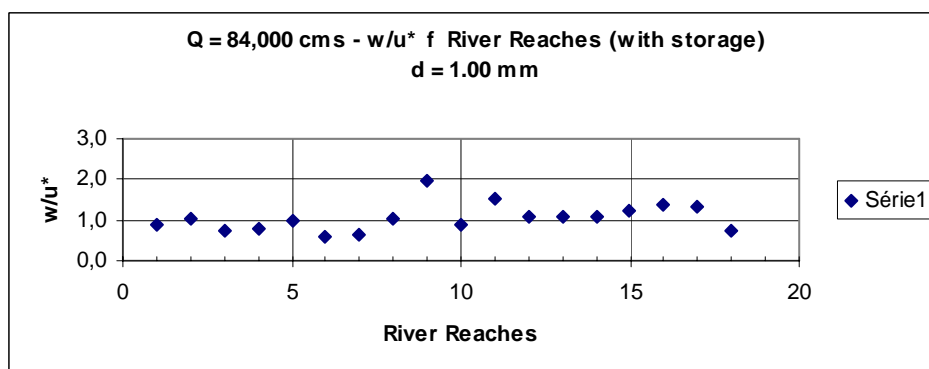


Grãos de 3,00 mm estão se movendo principalmente em saltitação e, em certas áreas, em suspensão.

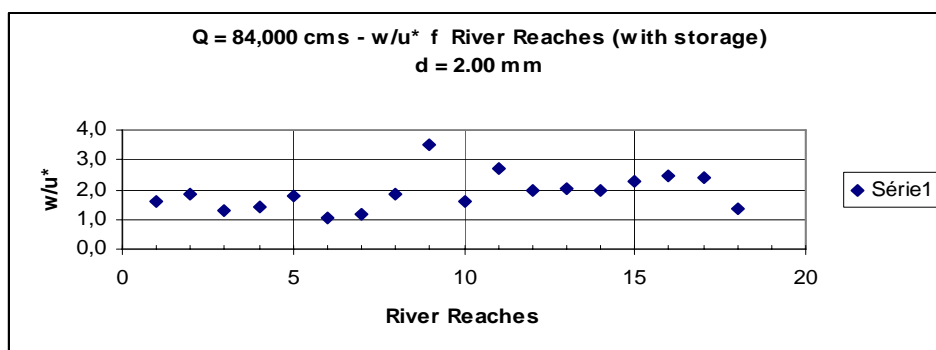


VIIIA – 84.000 m³/s

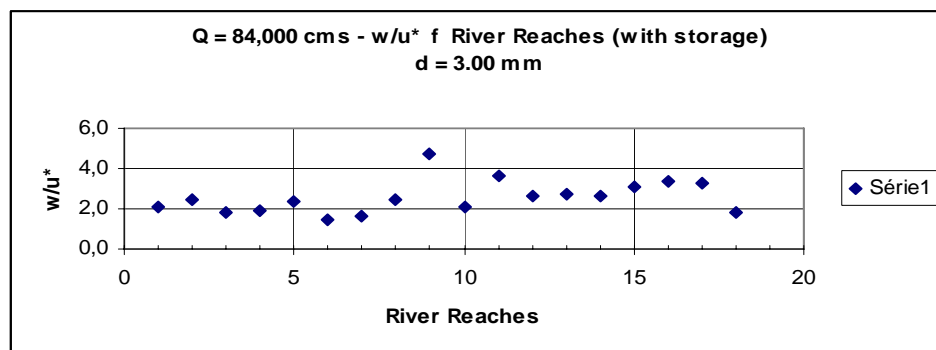
Grãos de 1,00 mm estão sendo transportados em suspensão ao longo de todo o comprimento de reservatório a fio d'água.



Grãos de 2,00 mm estão sendo transportados principalmente em suspensão e, em certas áreas, eles estão se movendo em saltitação.



Grãos de 3,00 mm estão se movendo principalmente em saltitação e, em certas áreas, sendo transportados em suspensão.



3. Principais Observações e Conclusões

Principais observações baseados em:

- revisão de vários relatórios
- visita ao rio e sítio do projeto
- análises das características de transporte de sedimentos com condições naturais e com o reservatório a fio d'água

São os seguintes:

3.1 Condições de fluxo do rio entre Jirau e Santo Antônio

Nas condições atuais, o rio Madeira entre Jirau e Santo Antônio tem vários afloramentos de rocha na forma de corredeiras e ilhas isoladas. Estes afloramentos de rocha tem estabilizado o perfil do leito do rio e controlam a inclinação da superfície d'água entre os trechos. Eles também criam localmente velocidades muito altas (fotos 4 e 5) e criam imediatamente a jusante praias de areia ou ilhas (fotos 8 e 9). Algumas das ilhas tem grandes árvores e outros tipos de cobertura vegetal. As ilhas principais são:

a) Ilha do Padre, b) Ilha Santana, c) Ilha Niterói, d) Ilha Liverpool, e) Ilha São Patrício, f) Ilha Tarumã, g) Ilha Camaleão e uma praia submersa de cascalho fino no Zé Paulino. Estes são bons exemplos e podem se vistos no Google Earth.

Comparadas com as condições existentes, todas as ilhas a jusante das corredeiras na seção 12 e no rio na seção 23 serão submersas anualmente. O aumento nas profundidades de submergências vão ser os seguintes (ref. Figuras 1.2.1 e 1.2.2):

- 22,00 m a 5,00 m para $Q = 5.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 19,00 m a 2,50 m para $Q = 10.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 15,00 m a 0,50 m para $Q = 18.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 7,00 m a 0,00 m para $Q = 48.600 \text{ m}^3/\text{s}$.

As reduções de velocidade do fluxo máximas e mínimas correspondentes são:

- 0,03 m/s a 0,93 m/s para $Q = 5.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 0,02 m/s a 1,44 m/s para $Q = 10.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 0,01 m/s a 1,96 m/s para $Q = 18.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 0,00 m/s a 0,99 m/s para $Q = 39.100 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 0,00 m/s a 0,97 m/s para $Q = 48.600 \text{ m}^3/\text{s}$.

Embora as reduções das velocidades de fluxo sejam significativas dentro do reservatório a fio d'água, as velocidades resultantes são ainda relativamente altas não permitindo a deposição de silte e argila, que compõem 85% do conteúdo total de sedimento. As velocidades de fluxo remanescentes no reservatório a fio d'água são os seguintes (ref. Tabela e Figura 1 a 8).

- 0,10 m/s a 0,25 m/s para $Q = 5.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 0,20 m/s a 0,55 m/s para $Q = 10.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 0,38 m/s a 0,95 m/s para $Q = 18.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 0,80 m/s a 2,00 m/s para $Q = 39.100 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 1,10 m/s a 2,45 m/s para $Q = 48.600 \text{ m}^3/\text{s}$.

Em especial durante as cheias anuais com vazões de $39.100 \text{ m}^3/\text{s}$ a $45.000 \text{ m}^3/\text{s}$, as velocidades são suficientemente altas para assegurar o transporte de grãos de areia. Considerando a cobertura vegetal de algumas das ilhas, pode ser assumido que estas ilhas devem crescer em tamanho e os leitos dos canais devem encher com areias. Entretanto, com o tempo as velocidades de fluxo vão aumentar gradualmente. Ao longo do tempo uma nova seção de equilíbrio do canal deve se fixar, como também o padrão sazonal de transporte de areia através do reservatório a fio d'água.

3.2 Condições de transporte de sedimento entre Jirau e Santo Antônio

Nas condições naturais o rio Madeira pode transportar areias e cascalhos finos de grãos com tamanhos mostrados na Figura 4,17. Com o reservatório as velocidades de fluxo ao longo de todo o reservatório a fio d'água vão ser reduzidos e para vazões menores do que $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ a capacidade de transportar areias deve ser reduzido consideravelmente. A capacidade de transportar areia no rio Madeira sob condições naturais e com o reservatório a fio d'água é indicada abaixo:

$$Q = 5.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

	d^{max} transportado em suspensão	d^{max} transportado em saltitação	d^{max} transportado por arraste	d inerte
Condições Naturais	1,00 mm	1,00 a 3,00 mm em certas áreas	3,00 mm em certas áreas	3,00 mm em certas áreas
Com o reservatório a fio d'água	0,40 mm em certas áreas 0,30 mm em certas áreas 0,20 mm ao longo de todo comprimento	0,50 mm em certas áreas 0,40 mm em certas áreas 0,30 mm em certas áreas	0,50 mm em certas áreas	1,00 mm ao longo de todo comprimento

$$Q = 10.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

	d^{max} transportado em suspensão	d^{max} transportado em saltitação	d^{max} transportado por arraste	d inerte
Condições Naturais	1,00 mm ao longo de todo comprimento 3,00 mm em certas áreas	3,00 mm em certas áreas	3,00 mm em certas áreas	3,00 mm em certas áreas
Com o reservatório a fio d'água	0,30 mm ao longo de todo comprimento	0,50 ao longo de todo comprimento	1,00 mm em certas áreas	1,00 mm em certas áreas

$$Q = 18.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

	d^{max} transportado em suspensão	d^{max} transportado em saltitação	d^{max} transportado por arraste	d inerte
Condições Naturais	1,00 mm ao longo de todo comprimento 3,00 mm em certas áreas	3,00 mm em certas áreas	3,00 mm em certas áreas	3,00 em certas áreas
Com o reservatório a fio d'água	1,00 mm em certas áreas 0,50 mm ao longo de todo comprimento	1,00 mm em certas áreas	1,00 mm em certas áreas	

$$Q = 39.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

	d^{max} transportado em suspensão	d^{max} transportado em saltitação	d^{max} transportado por arraste	d inerte
Condições Naturais	1,00 mm over the entire length	3,00 mm ao longo de todo comprimento	3,00 mm em certas áreas	3,00 mm em nenhum lugar
Com o reservatório a fio d'água	1,0 mm ao longo de todo comprimento	2,00 mm ao longo de todo comprimento 3,00 ao longo de todo comprimento	3,00 mm ao longo de todo comprimento	3,00 mm em nenhum lugar

$$Q = 48.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

	d^{max} transportado em suspensão	d^{max} transportado em saltitação	d^{max} transportado por arraste	d inerte
Condições Naturais	1,00 mm ao longo de todo comprimento 3,00 mm em certas áreas	3,00 mm ao longo de todo comprimento	3,00 mm em nenhum lugar	3,00 mm em nenhum lugar
Com o reservatório a fio d'água	1,00 mm ao longo de todo comprimento 2,00 mm em certas áreas	3,00 mm ao longo de todo comprimento	3,00 mm em nenhum lugar	3,00 mm em nenhum lugar

Pode ser concluído que, embora com baixas vazões (menos que 18.000 m³/s), o movimento de areias grossas não é generalizado, a partir de 39.100 m³/s, entretanto, todas as areias são transportadas em suspensão e cascalhos finos são movidos em saltitação ao longo de todo o comprimento do reservatório a fio d'água.

Assim, o acúmulo de areias grossas e cascalhos finos deve ser um processo muito lento e intermitente e limitado a áreas específicas. Após muitos anos de operação com depósitos de saturação generalizados, o transporte de toda carga de material do fundo será restaurado.

3.3 Necessidades de melhorar o processo de evacuação de areias grossas e cascalhos finos através do vertedouro com mudança do arranjo do projeto.

O atual transporte de carga de fundo na área do projeto é claramente ao longo da margem direita. O atual arranjo e posição do vertedouro conforme indicado na Figura 3.3.1 não é completamente satisfatória.

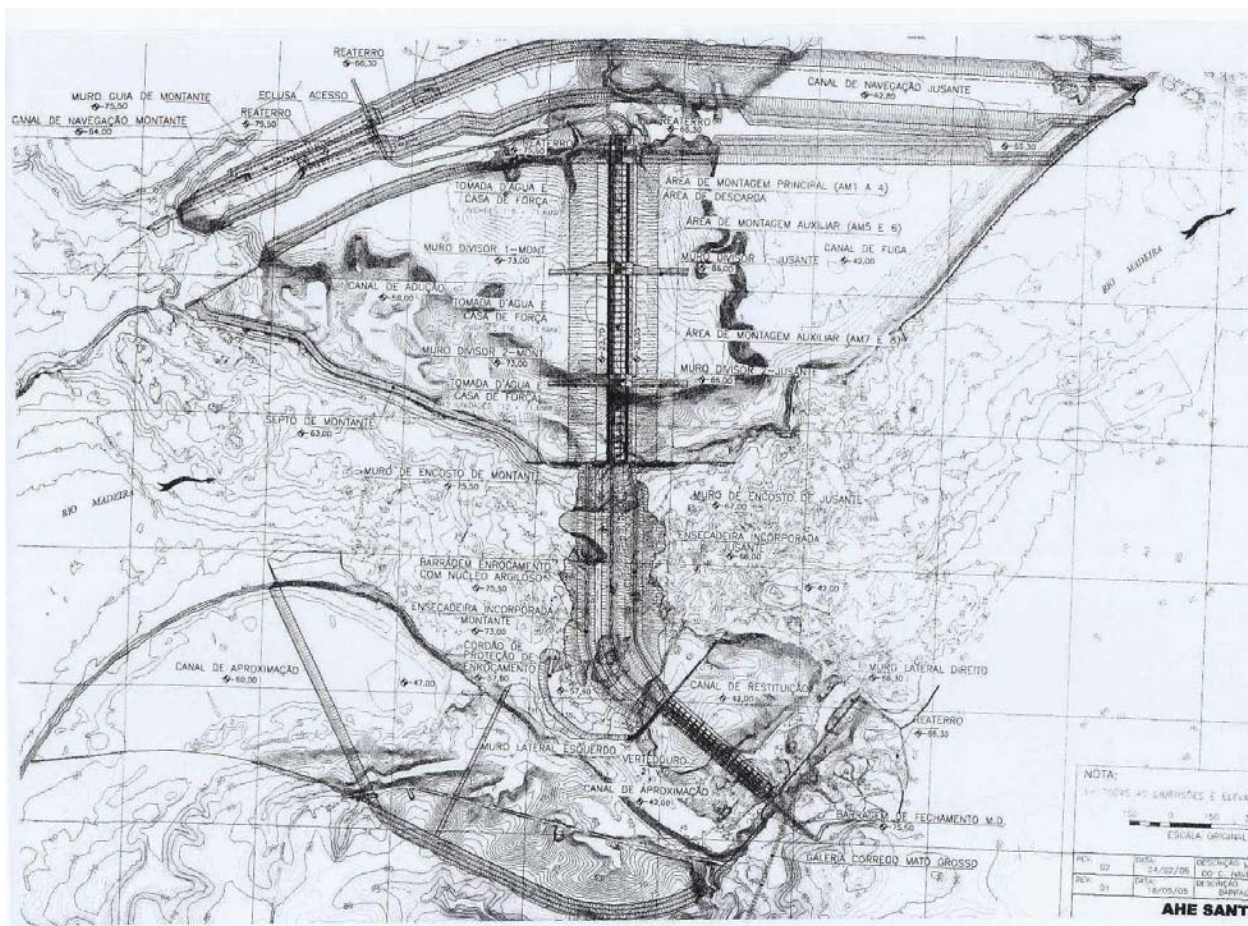


Figura 3.3.1 – Arranjo Geral proposto por PCE, FURNAS e ODEBRECHT
 -ref: Desenho PJ-0532-V3-GR-DE-0021) proposto por PCE, FURNAS e ODEBRECHT

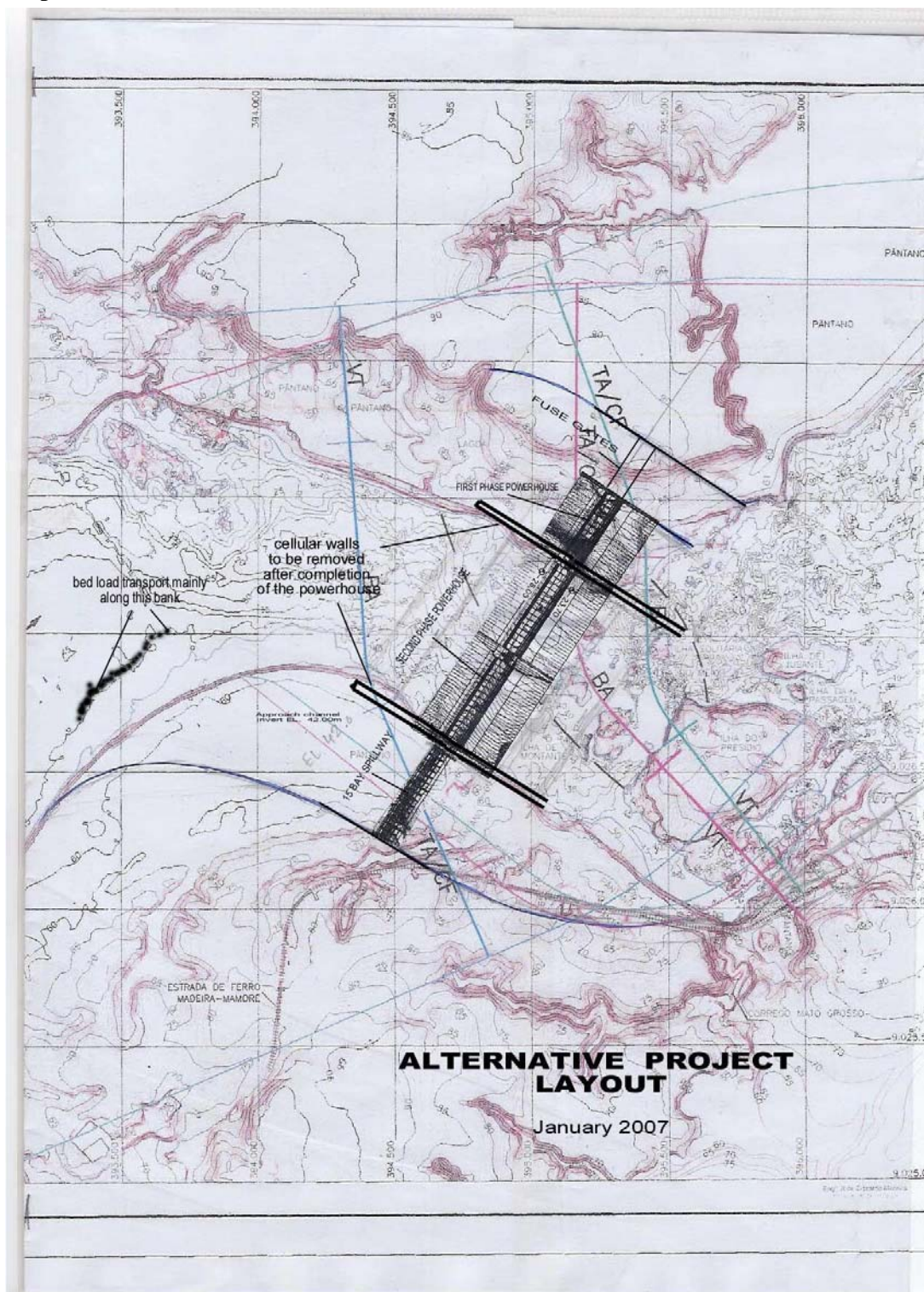
A grande dispersão das estruturas resulta em aumento da superfície de fluxo em largura de 1.000 m atualmente para 2.700 m. Este fato junto com o aumento da profundidade de fluxo deve modificar as velocidades de fluxo e correntes secundárias nesta área assim impactando o transporte da carga de fundo em geral.

Também, o arranjo do vertedouro, em conjunto com o muro de arrimo esquerdo, deve criar condições de aproximação muito ruins para algumas das comportas no lado esquerdo do vertedouro.

Durante a visita ao sítio, ficou evidente que o material flutuante e submerso deve atingir as grades de proteção das tomadas d'água causando problemas sérios a geração contínua de energia elétrica. O arranjo do projeto e as locações estruturais são importantes do ponto de vista das condições operacionais. Assim um arranjo mais compacto é proposto de maneira a manter as atuais condições transporte de areias grossas e cascalhos finos.

O desenho de um arranjo alternativo do projeto, que parece mais adequado, é mostrado na Figura 3.2. Este arranjo também propõe várias mudanças principais no conceito do projeto que, em nossa opinião, deve melhorar significamente o projeto. As sugestões são as seguintes:

- Reduzir o número de comportas de segmento de 21 para 15 e deslocar o vertedouro para montante, perto da área com depósitos de areia grossa e cascalhos finos. A nova capacidade do vertedouro seria 60.000 m³/s.



construção. Isso pode eliminar a barragem de enrocamento e reduzir significativamente o volume total de escavação. A largura total da superfície d'água no reservatório a fio d'água seria de 1.700 m no lugar de 2.700 m, com redução de 1.000 m.

- A possibilidade de passar parte das cheias pela tomada d'água/casa de força deve também somar a capacidade de evacuar as cheias durante uma emergência. Também deve reduzir variações dos níveis a jusante e a montante no caso da parada total da usina.

ANEXO – I

- **Necessidade de um estudo compreensivo de modelo hidráulico.**

A necessidade de um estudo de modelo hidráulico é evidente e nós recomendamos que o modelo hidráulico do estado de arte seja construído e um estudo compreensivo seja efetuado o mais breve possível.

- **Otimização do arranjo do projeto e desenho hidráulico.**

O modelo hidráulico deve permitir que os projetistas possam verificar os desempenhos dos projetos propostos e se necessário otimizar os vários arranjos estruturais. Tal modelo deve permitir também que se possa otimizar o total de escavação de rocha e seqüência da construção. O modelo pode ser usado particularmente para estudar os seguintes aspectos:

- **Evacuação segura de areia.**

As características do transporte de areia da AHE Santo Antônio não deve ser um problema real com relação ao assoreamento do leito na face montante da usina ou vertedouro, conforme temido pelos projetistas. Entretanto, por causa das quantidades anuais de sedimento extremamente altas, as concentrações de areia são às vezes muito altas. O desenho estrutural deve tentar reduzir ao máximo a quantidade de areia passando pelas turbinas. Assim o modelo hidráulico pode fazer um papel importante como:

- Verificação do transporte de areia existente pelo sítio do projeto incluindo a segregação dos tamanhos dos grãos de areia observado ao longo do leito do rio imediatamente a montante e a jusante das estruturas propostas.
- Definir o arranjo estrutural ótimo que permita a passagem segura do transporte de areia pelo projeto, ou seja, que a grande parte da areia passe pelas comportas do vertedouro quando estas comportas estiverem abertas para passar as vazões em excesso afluentes à usina.
- Melhor procedimento de operação das comportas do vertedouro para atingir a rota de evacuação requerida da areia do reservatório para o rio a jusante.

- **Transporte de madeira flutuante e submersa ³**

Nós achamos que, em Santo Antônio, o problema de gerenciar a madeira flutuante pode ser um problema maior e deve requerer um desenho inovador de equipamento de limpar grades e do arranjo do projeto e conceito de evitar a formação de grandes massas de entulho junto as grades.

O modelo hidráulico pelo ser usado para melhor entender o processo das condições de aproximação e acumulação da madeira flutuante no sentido de desenvolver soluções práticas como:

- Simular, o melhor possível, no modelo físico as formas observadas de transporte de madeira flutuante e submersa, características da madeira, taxas e quantidades máximas diárias.
- Tentativas de desenvolver arranjos estruturais e distribuições dos fluxos de aproximação de maneira que a madeira não crie grandes entulhos junto às grades das tomadas d'água ou às comportas do vertedouro na subida das hidrógrafas das cheias.
- Prevenção para que o grosso da madeira flutuante não se junte nas grades de proteção. Se possível manter as grandes árvores em circulação no reservatório, longe das grades ou comportas do vertedouro. Assim pode ser removido gradualmente o entulho com a ajuda de guindastes especiais colocados em locais convenientes. O modelo hidráulico pode indicar o melhor arranjo estrutural para atingir isso.

³ Seria útil observar e documentar as condições de aproximação á área do projeto da madeira flutuante e submersa sobre várias condições da vazão do rio além de informações sobre a composição e volume anual aproximado.

Na usina de baixa queda, Sidney A. Murray, localizada no rio Mississippi em Lousiana, somente 15% da vazão do rio Mississippi passa pela usina. Esta usina, como uma vazão de 4.500 m³/s e vazão unitária de 562 m³/s, tem oito unidades de 8,2 m de diâmetro. O volume anual de entulho flutuante é cerca de 115.000 m³ dos quais 20 a 30% é material submerso.

• **Formação de vórtices de entrada de ar nas tomadas d'água das turbinas bulbo**

Para projetos de baixa queda, frequentemente tais vórtices são induzidos pelo fluxo, quer dizer, formados pela separação do fluxo causada por uma combinação de direções do fluxo de aproximação e o arranjo estrutural perto da tomada d'água. As velocidades circulantes de superfície gradualmente se organizam e se transforma em vórtices de entrada de ar estável.

Para um projeto de baixa queda, o ar incluso vai diretamente à câmara do rotor causando flutuações de pressão violentas resultando em vibrações severas das turbinas e estruturas da usina. Para estas vazões é recomendado que modificações estruturais adequadas sejam feitas assim eliminando ou atenuando as formações de tais vórtices pelo uso de um modelo físico tridimensional.

• **Perda na tomada d'água e canal de fuga**

Por definição, em projetos de baixa queda, cada centímetro é importante. Assim o modelo hidráulico pode ajudar a melhorar o desempenho por:

- Melhorar o fluxo de aproximação da tomada d'água e condições do tubo de sucção para reduzir perdas de queda e recuperar queda de velocidade na área do canal de fuga.

Propagação de surgências (montante e jusante) devido ao total ou parcial fechamento e/ou início de operação.

O modelo hidráulico pode facilmente simular e avaliar os impactos das surgências transientes no sítio do projeto por:

- Simular a propagação de surgências a montante e jusante devido a rejeição de carga e / ou tomada de carga de todas as unidades ou certo número de unidades.
- Simular os efeitos mitigantes de “sluicing” em tais eventos por fechamento parcial das comportas dos tubos de sucção.

• **Seqüências de construção**

O arranjo geral estrutural do projeto vai impactar o sequenciamento das obras de construção que devem impactar fatos como:

- Acesso aos vários canteiros de obra.
- Necessidade de construção de pontes.
- Volume de escavação em rocha.
- Tempo total de construção civil, etc.

O modelo físico hidráulico compreensivo pode ser de grande ajuda para otimizar o arranjo do projeto e conceitos estruturais assim garantindo melhor desempenho geral. Redução de custos e redução de alguns dos riscos que vem da hidrologia da bacia, em particular durante o sequenciamento de construção.