

AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS ATRAVÉS DOS RESERVATÓRIOS DAS USINAS DE SALTO OSÓRIO E SALTO SANTIAGO

Rubem Luiz Daru¹; Irani dos Santos²

RESUMO --- Este artigo tem como objetivo avaliar a vazão sólida afluyente e defluente dos reservatórios das usinas de Salto Osório e Salto Santiago, o que caracteriza a eficiência da retenção dos sedimentos, tendo em vista o impacto sobre a vida útil dos reservatórios. Apresenta os métodos utilizados, análises efetuadas e resultados obtidos. Apresenta ainda novas medições de vazão realizadas que confrontados com os resultados obtidos validam a metodologia adotada.

ABSTRACT ---This article has as objective evaluates the solid inflow and outflow of the reservoirs of Salto Osório's plants and Salto Santiago, what characterizes the efficiency of the retention of the sediments, tends in view the impact about the useful life of the reservoirs. It presents the used methods, made analyses and obtained results. It still presents new flow measurements accomplished that confronted with the obtained results validate the adopted methodology.

Palavras-chave --- Assoreamento, rio Iguazu, transporte de sedimentos.

1) Pesquisador no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. Centro Politécnico s/n, Jardim das Américas, Curitiba.
E-mail: daru@lactec.org.br

2) Professor do Departamento de Geografia da UFPR. Caixa Postal 19001, CEP 81531-980, Curitiba - PR. E-mail: irani@ufpr.br

1 INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta, de forma resumida, parte das atividades desenvolvidas para o projeto de pesquisa denominado “*Análise e Avaliação do Transporte de sedimentos através de reservatórios*”. O projeto foi um estudo contratado pela Tractebel Energia S.A. junto ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, por meio do Programa P&D ANEEL, visando avaliar a vazão sólida afluente e defluente e a determinação da vida útil de dois reservatórios localizados no rio Iguazu.

O rio Iguazu é o principal rio do Estado do Paraná e corre essencialmente na direção leste-oeste, a partir de suas nascentes nas proximidades de Curitiba, drenando uma área de cerca de 67.483 km².

As seções de interesse deste estudo localizam-se nos eixos das barragens das UHE’s Salto Santiago e Salto Osório, cujas drenagens abrangem áreas de 43.852 e 45.769 km², respectivamente. Atualmente, os reservatórios localizados a montante que exercem influência nestas duas usinas são Foz do Areia, Segredo e Derivação do Jordão. O reservatório da UHE Salto Santiago é de regularização e o da UHE Salto Osório enquadra-se como praticamente reservatório a fio-de-água.

2 MÉTODO DE ANÁLISE UTILIZADO

Para a análise das vazões sólidas afluentes e defluentes e seus efeitos na vida útil dos reservatórios, buscou-se utilizar a metodologia que melhor se adapta a bacia do rio Iguazu tendo em vista suas características fisiográficas, sendo também compatível com os dados existentes.

Basicamente os resultados deste estudo são obtidos através dos dados fornecidos pelas medições simultâneas de transporte de sedimentos e vazão líquida e a análise do assoreamento de reservatórios.

2.1 Medições de vazões líquidas

Dentre os diversos métodos de medição de vazão o mais comumente utilizado é o método convencional utilizando molinete hidrométrico. Ultimamente, este método tem sido complementado pelo método acústico utilizando o aparelho ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), que é baseado no conceito do efeito Doppler para obtenção das descargas líquidas. Mais detalhes destes métodos são apresentados em Santos *et al.* (2001).

Neste estudo foram utilizadas medições de vazões líquidas obtidas pelo método convencional e pelo ADCP.

2.2 Medições de transporte de sedimentos

A vazão sólida total é composta pela soma da vazão sólida em suspensão e a vazão sólida do leito (cargas transportadas por arraste e saltação).

A vazão sólida em suspensão é o produto da concentração de sedimentos em suspensão pela vazão líquida medida no momento da amostragem.

A vazão sólida do leito pode ser obtida a partir de dados medidos diretamente, entretanto existem muitas dificuldades operacionais nestas medições e as mesmas são raramente realizadas pelas entidades responsáveis pela operação da rede hidrométrica oficial Brasileira. Para a determinação indireta da vazão sólida do leito existem vários métodos, sendo os mais utilizados os de Colby, Einstein e Meyer-Peter e Muller. Mais detalhes destes métodos são apresentados em Santos *et al.*(2001). Eles são baseados em equações empíricas.

O método de Colby foi escolhido porque na maioria dos dados históricos das medições sistemáticas de sedimentos não foi realizada a análise granulométrica dos sedimentos, não sendo assim possível analisar a vazão sólida através da utilização do método de Einstein. Além disso, Colby é um método mais simples, pois não é necessário estimar o coeficiente de Manning do escoamento. Meyer-Peter estimaram suas equações para rios com profundidades menores que 1,2 metros, não sendo adequadas para o rio Iguaçu.

2.3 Assoreamento em reservatórios

O volume assoreado em um reservatório depende principalmente da eficiência de retenção dos sedimentos e do peso específico aparente dos sedimentos depositados, além é claro, da vazão sólida total afluente.

A eficiência de retenção foi estimada pela curva de Brune (Burec, 1977). O peso específico aparente inicial dos sedimentos depositados foi estimado pelos métodos de Lara e Pemberton (Carvalho, 1991), enquanto que o peso específico após um determinado tempo foi estimado pelo método de Miller (Koelzer e Lara, 1958). Um fator importante, em ambos os métodos, para esta estimativa do peso específico é o tipo de operação do reservatório, que podem ser de regularização (reservatório geralmente vazio, normalmente vazio ou depleção de pequena a média) ou operação a fio d'água (sedimentos sempre ou quase sempre submersos).

3 ESTUDO DE CASO

Os reservatórios de Salto Osório e Salto Santiago estão localizados no rio Iguaçu a jusante dos reservatórios de Segredo, Derivação do Jordão e Foz do Areia. Na avaliação da vazão sólida

afluente e do tempo de assoreamento destes reservatórios as seguintes etapas foram realizadas:

3.1 Avaliação do Transporte de Sedimentos

Na avaliação do transporte de sedimentos utilizou-se dados históricos de 11 estações fluvio-métricas localizadas na bacia do rio Iguaçu a montante do eixo de Salto Osório e 5 estações fluvio-métricas da bacia do rio Chopim.

O rio Chopim se localiza na bacia do rio Iguaçu, porém a jusante do eixo de Salto Osório. Sua utilização é justificada pelas suas características hidrológicas, morfológicas, uso do solo, dentre outras, muito similares à bacia do rio Iguaçu entre as usinas de Salto Osório e Foz do Areia.

A partir dos dados de descarga líquida específica, q_l (l/s/km²) e da descarga sólida total específica q_{st} (t/ano/km²), obtidas pelo método de Colby, foram ajustadas curvas de descarga sólida regionais, por meio do método dos mínimos quadrados.

Para a realização dos ajustes das curvas de descarga sólida regionais adotou-se a divisão da bacia em dois trechos: bacia a montante de Foz do Areia e bacia incremental entre Foz do Areia e Salto Osório. Esta divisão foi adotada devido à diferença entre tendências dos ajustes das curvas de descarga sólida, sendo justificada pelas características diversas da bacia. As diferenças entre as bacias são significativas em termos de geologia, ocupação do solo, inclinação do leito, o que se reflete nos sedimentos transportados.

As equações ajustadas para os trechos a montante de Foz do Areia e área da bacia incremental entre Foz do Areia e Salto Osório são, respectivamente:

$$q_{st} = 0,8795 q_l^{1,3883} \quad (R^2 = 0,7507) \quad (1)$$

$$q_{st} = 0,3633 q_l^{1,4891} \quad (R^2 = 0,8436) \quad (2)$$

Na figura 1 são apresentados os ajustes das curvas de descarga sólida para 3 estações fluvio-métricas a montante de Foz do Areia e para a bacia a montante de Foz do Areia como um todo, mostrando as equações de ajuste. Mostra ainda linhas representativas dos fatores 0,5 e 2 para curva regional.

Na figura 2 são apresentados os ajustes das curvas de descarga sólida para os rios Jordão, Chopim e outros pequenos afluentes do rio Iguaçu e para a bacia incremental entre Foz do Areia e Salto Osório, mostrando as equações de ajuste. Mostra ainda linhas representativas dos fatores 0,5 e 2 para curva regional.

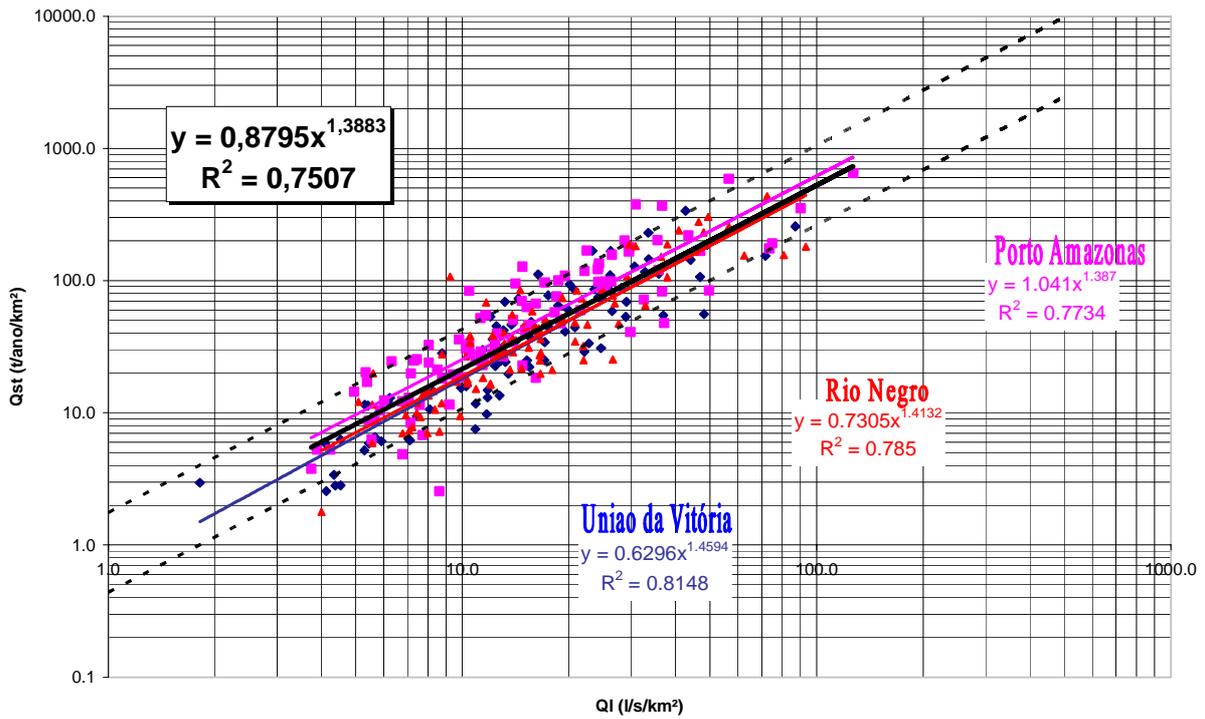


Figura 1. Curva de descarga sólida para a bacia a montante de UHE Foz do Areia.

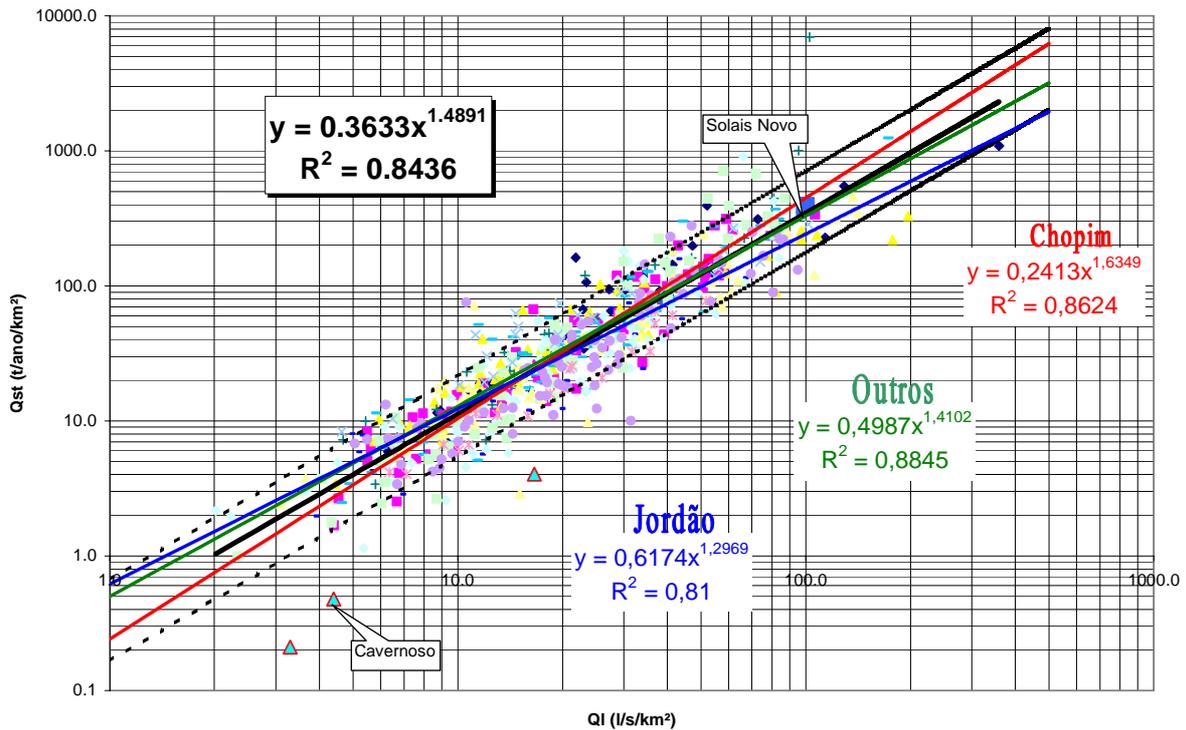


Figura 2. Curva de descarga sólida para a bacia entre UHE Foz do Areia e UHE Salto Osório.

3.2 Avaliação do assoreamento nos reservatórios

Na estimativa do tempo de assoreamento dos reservatórios de Salto Osório e Salto Santiago foi realizada uma análise conjunta dos assoreamentos de toda a cascata de reservatórios do rio Iguaçu a montante de tais usinas. Quando um dos reservatórios a montante se torna totalmente assoreado, a eficiência de retenção se torna praticamente nula e a vazão sólida afluyente aos reservatórios a jusante aumenta, diminuindo a vida útil destes.

O cálculo, realizado de montante para jusante, consistiu na avaliação do tempo de assoreamento e eficiência de retenção das usinas a montante.

As vazões sólidas médias anuais afluentes aos reservatórios, provenientes das áreas incrementais imediatamente a montante de cada usina, foram estimadas com auxílio de (1) e (2) e das curvas de permanência das vazões diárias naturais incrementais obtidas de Santos *et al.* (2003). Os valores obtidos foram duplicados para levar em conta um aumento de produção de sedimentos devido a ações antrópicas na bacia e são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Descarga sólida (t/ano) proveniente das áreas incrementais imediatamente a montante

Foz do Areia	D. do Jordão	Segredo	S. Santiago	S. Osório
2656774	375319	702050	300444	117112

O volume assoreado foi avaliado considerando os seguintes tópicos:

- Tempo de assoreamento dos reservatórios a montante;
- Eficiência de retenção dos reservatórios a montante;
- Descarga sólida média anual ao reservatório;
- Eficiência de retenção do reservatório; e
- Peso específico aparente do sedimento depositado.

As eficiências de retenção, estimadas pela curva de Brune são apresentadas da tabela 2.

Tabela 2 - Eficiência de retenção de sedimentos dos reservatórios (%)

Foz do Areia	D. do Jordão	Segredo	S. Santiago	S. Osório
94,4	66,4	88,9	93,2	70,5

O peso específico aparente inicial dos sedimentos depositados foi avaliado pelo método de Lara e Pemberton e o peso específico aparente após um determinado tempo pelo método de Miller. Como não estão disponíveis os dados de granulometria, adotou-se nos cálculos os valores de 10% de areia, 45% de silte e 45% de argila. Como o tipo de operação do reservatório também influi no peso específico dos sedimentos, todas as usinas estudadas foram consideradas com depleção de pe-

quena a média, exceto Salto Osório que foi considerado operando com “sedimentos sempre ou quase sempre submersos” (fio d’água).

A tabela 3 apresenta os valores estimados do tempo de assoreamento do volume correspondente à cota da tomada de água.

Tabela 3 - Estimativas do tempo de assoreamento nos reservatórios (anos)

Foz do areia	D. do Jordão	Segredo	S. Santiago	S. Osório
426	136	721	995	1088

4 VERIFICAÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS

O LACTEC realizou medições de descarga líquida e sólida utilizando o ADCP no período de dezembro de 2004 a março de 2005. Os locais de medição foram imediatamente a jusante das usinas de Segredo (UHSE), Salto Santiago (UHSS) e Salto Osório (UHSSO) e na estação fluviométrica de Usina Cavernoso, no rio Cavernoso.

O rio Cavernoso é um afluente do rio Iguaçu na bacia incremental entre as usinas de Salto Santiago e Segredo. As 3 medições realizadas pelo LACTEC no rio Cavernoso são mostradas na figura 2 juntamente com outras medições de vazões sólidas e líquidas e o ajuste adotado. A utilização de (2) na bacia do rio Cavernoso, para relacionar as vazões sólidas com as vazões líquidas, superestima a descarga sólida conforme mostra a figura 2. Entretanto, foi utilizado (2) para a bacia do rio Cavernoso devido à reduzida quantidade de medições realizadas nesta bacia. Como esta bacia possui uma densidade florestal maior que a média da bacia incremental entre Salto Osório e Foz do Areia, isto pode sugerir a menor produção de sedimentos, no entanto, isto deve ser validado com uma quantidade maior de medições de descarga sólida. Fica como sugestão o monitoramento sistemático do transporte de sedimentos do rio Cavernoso para uma futura definição da curva de descarga sólida para esta bacia.

As demais medições realizadas pelo LACTEC foram confrontadas com os valores obtidos utilizando (2) e as eficiências de retenção iniciais (tabela 2). A tabela 4 apresenta esta comparação. Os resultados foram calculados utilizando (2), adaptando-se os valores para vazões defluentes multiplicando-os pelo inverso da eficiência de retenção. Neste procedimento tomou-se o devido cuidado na conversão de unidades e nas áreas de drenagens utilizadas.

Tabela 4 - Comparação entre medições realizadas e valores utilizados

Jusante de	Medições realizadas		Equação	$q_{stmedido}/q_{st}$
	q_l l/s/km ²	$q_{stmedido}$ t/dia/km ²	q_{st} t/dia/km ²	
UHSE	38,34	21,67	9,20	2,36
UHSE	34,50	13,29	7,86	1,69
UHSE	25,91	8,65	5,13	1,69
UHSS	34,99	10,70	4,94	2,17
UHSS	35,14	5,63	4,97	1,13
UHSS	34,59	7,05	4,86	1,45
UHSO	33,32	25,17	19,87	1,27
UHSO	25,41	24,95	13,27	1,88
UHSO	29,80	42,76	16,82	2,54

Analisando a tabela 4, todas as medições de vazão a jusante das usinas se apresentaram aproximadamente dentro da faixa aceitável para medições de descarga sólida ($0,5 < q_{stmedido}/q_{st} < 2,0$), sugerindo que os valores de eficiência de retenção e as equações de descarga sólida utilizadas estão coerentes.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho avaliou a vazão sólida afluente e defluente aos reservatórios de Salto Osório e Salto Santiago, obtendo o tempo estimado para o assoreamento destes reservatórios.

As vazões sólidas foram estimadas através de medidas diretas de sedimentos e utilizando a metodologia de Colby para a obtenção da curva de descarga sólida. A eficiência de retenção dos sedimentos nos reservatórios foi calculada conforme curva de Brune e o tempo de assoreamento através de metodologia descrita em Carvalho (1991). Os assoreamentos em Salto Santiago e Salto Osório foram obtidos levando em conta o efeito dos reservatórios a montante (Segredo, Derivação do Jordão e Foz do Areia). Os reservatórios menores localizados nos rios afluentes ao rio Iguazu (usina Cavernoso e futuras usinas do rio Jordão) não foram considerados ou por serem usinas praticamente a fio d'água ou devido a falta de dados.

A tabela 5 apresenta os resultados. Nesta tabela a vazão sólida afluente corresponde à situação atual, isto é, sem que nenhum reservatório a montante esteja totalmente assoreado.

Tabela 5 - Resultados para os reservatórios de Salto Santiago e Salto Osório

Reservatório	Vazão sólida afluente (t/ano)	Eficiência de retenção (%)	Tempo de assoreamento (anos)
Salto Santiago	408948	93,2	995
Salto Osório	145044	70,5	1088

Foram realizadas medições de vazões sólidas e líquidas logo a jusante dos reservatórios de

Salto Santiago, Salto Osório, Segredo e na estação fluviométrica Usina Cavernoso. Estas medições validaram a metodologia adotada, exceto para a bacia do rio Cavernoso. Recomenda-se a realização de medições sistemáticas do transporte de sedimentos na estação fluviométrica Usina Cavernoso para confirmar a menor produção de sedimentos nesta bacia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições de R. F. C. Gibertoni e I. I. Müller, obtidas durante a elaboração deste trabalho. Os autores também agradecem a Tractebel Energia S.A. que por meio do Programa P&D ANEEL financiou este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUREC (1977). “Bureau of reclamation – Design of small dams”. Appendix H. Washington, p. 767-796.

CARVALHO, O. N. (1991). “Curso de transporte e dispersão de sedimentos e cálculo de vida útil dos reservatórios”. Curitiba: SUREHMA, Convênio de Cooperação Técnica SUREHMA – GTZ. 227p.

KOELZER, V. A.; LARA, J. M. (1958). “Densities and compaction rates of deposited sediment”. In: Journal of the Hydraulics Division. ASCE. p.1-15.

SANTOS, I. et al (2001). “Hidrometria Aplicada”. Curitiba: LACTEC, 372p.

SANTOS, I. et al (2003). “Projeto Hg-193 Estudos de consistência e reconstituição de séries de vazões naturais na bacia do rio Iguaçu”. Curitiba: LACTEC/CEHPAR.