

DESEMPENHO DE MODELOS NUMÉRICOS EM ESTUDOS DE ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS – ESTUDO NA UHE AIMORÉS

Joel Raimundo Cortez^{1} & Mário Cicareli Pinheiro² & Márcio Benedito Baptista³*

Resumo – A vida útil de uma usina hidrelétrica está associada ao tempo necessário para que os sedimentos afluentes ocupem o volume útil do reservatório ou comprometam as estruturas de adução do empreendimento. Dado que é inevitável a retenção de sedimentos por uma barragem, torna-se necessário buscar o entendimento sobre os processos de produção, transporte e deposição das partículas sólidas dentro do ciclo sedimentológico.

No presente trabalho o desempenho de modelos matemáticos e metodologias empíricas face à qualidade e quantidade de dados é verificado a partir da comparação dos resultados obtidos pela aplicação de modelos matemáticos e o método empírico de redução de área de Borland & Miller. Para tanto, foram empregadas simplificações dos modelos e degradações dos dados de entrada na criação de cenários objetivando a verificação dos desempenhos das metodologias empregadas.

A análise de sensibilidade e a influência de cada parâmetro de entrada foi realizada a partir da comparação dos resultados obtidos para cada cenário, com o emprego do software HEC-RAS como suporte para a solução analítica das equações de transporte de sedimentos e o método empírico de redução de área de Borland & Miller.

Palavras-Chave – assoreamento, reservatórios, modelos matemáticos.

PERFORMANCE OF NUMERICAL MODELS IN STUDIES OF AGGRADATION OF RESERVOIRS – CASE STUDY OF AIMORÉS HYDROELECTRICAL PLANT

Abstract – The lifetime of a hydroelectric power plant is associated with the time required for sediments tributaries occupy the live storage or compromise the supply structures. That it is inevitable the retention of sediments by a dam, it is necessary the understanding of the processes of production, transport and deposition of solid particles in the sedimentological cycle.

This paper presents the performance of mathematical models and empirical methodologies given the quality and quantity of data is checked from the comparison of the results obtained by the application of mathematical models and the empirical method of area reduction of Borland & Miller. To this end, were employed simplifications of the models and degradations of the input data in the creation of scenarios with the verification of the performance of the employed methodologies.

The sensitivity analysis and the influence of each input parameter was held from the comparison of the results obtained for each scenario with the use of HEC-RAS software to support the analytical solution of the equations of sediment transport and the empirical method of area reduction of Borland & Miller.

Keywords – Aggradation, reservoir, mathematical models.

¹ Mestrando em Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Avenida Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-901. Belo Horizonte – MG – Brasil. Telefone: (31) 3409-4081. E-mail: cortez.joel@hotmail.com

² Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Avenida Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-901. Belo Horizonte – MG – Brasil. Telefone: (31) 3409-4081. E-mail: mario.cicareli@potamos.com.br

³ Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Avenida Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-901. Belo Horizonte – MG – Brasil. Telefone: (31) 3409-4081. E-mail: marcio.baptista@chr.ufmg.br

INTRODUÇÃO

O estudo do processo de assoreamento de um reservatório é essencial para a definição da vida útil do empreendimento, fator este que poderá auxiliar na tomada de decisão quanto à viabilidade econômica e ambiental do empreendimento.

Metodologias empíricas ou semi-empíricas, consagradas no setor elétrico, são utilizadas para a determinação das frações dos volumes sólidos afluentes a serem retidos pelo reservatório, dada a regra operativa, granulometria do sedimento e séries descargas sólidas e líquidas afluentes.

Por outro lado, é cada vez mais frequente o emprego *softwares* capazes de simular o transporte e deposição dos sedimentos em um curso d'água ou no interior de um reservatório. Destaca-se que o grau de complexidade dos modelos é diretamente proporcional ao conjunto de dados (em quantidade e qualidade) a serem fornecidos, isto é, para a simulação do transporte de sedimentos em 2 ou 3 dimensões, é necessário maior volume de dados que os requisitados para elaboração de um modelo unidimensional.

Séries históricas consistidas de dados sedimentométricos são raras e quando disponíveis, em sua maioria, de reduzida extensão. Por serem realizadas a partir de coletas não regulares, dificilmente cobrem uma ampla gama de vazões em uma determinada seção fluvial.

A partir da necessidade de se estimar a vida útil de um empreendimento e deparando-se com a dificuldade de aquisição de dados, pode ser mais adequada a aplicação de metodologias empíricas para a determinação do assoreamento do reservatório, por requisitarem um menor conjunto de dados, que a realização de modelagens matemáticas a partir de *softwares* para a simulação do transporte de sedimentos.

Neste sentido, é desenvolvido o presente estudo, o qual objetiva a comparação dos resultados obtidos através da modelagem unidimensional do transporte de sedimentos e da aplicação da metodologia empírica de Redução de Área, desenvolvida por Borland & Miller (1958) para a determinação dos volumes de sedimentos retidos pelo reservatório da UHE Aimorés.

METODOLOGIA – DESENVOLVIMENTO DOS ESTUDOS

O desenvolvimento dos trabalhos desdobrou-se nas seguintes atividades: revisão da literatura, coleta, análise e tratamento dos dados, definição de cenários a partir da degradação dos dados disponíveis e, por fim, uma análise comparativa dos resultados obtidos por cada cenário, de forma a quantificar a aproximação dos resultados obtidos por modelagens matemáticas e aplicação da metodologia empírica de Borland & Miller para a previsão da evolução dos depósitos de sedimentos. As diferentes etapas são descritas a seguir, juntamente com sua aplicação ao reservatório da UHE Aimorés.

Localização e caracterização da Usina de Aimorés

A Usina de Aimorés, com capacidade instalada de 330 MW, foi construída através de uma parceria da Vale com a Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig). A hidrelétrica está implantada no trecho médio do rio Doce, tendo seu eixo situado a montante do final do reservatório da Usina Hidrelétrica de Mascarenhas (cerca de 10 km) e da foz do rio Manhuaçu (3 km) (<http://www.uheaimores.com.br>, 2013).

De acordo com CBDB (2009), o projeto de Aimorés pode ser considerado composto de duas partes separadas:

1. Barragem principal de terra, com 18,0 m de altura e 565,0 m de comprimento a partir da margem direita, contígua ao sistema extravasor, que se estende até a Pedra Lorena, na margem

esquerda;

2. Um circuito de adução, que inclui um canal de 12 km de comprimento escavado na margem esquerda, e no final uma casa de força que abriga três turbinas do tipo Kaplan.

As principais características do reservatório e as principais variáveis hidrológicas da bacia de contribuição são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Ficha técnica da Usina de Aimorés. (Fonte: CBDB, 2009)

Reservatório		Dados Gerais	
Área El.90,0m	30,9 km ²	Área de contribuição do reservatório	62.167 km ²
Área El.92,0m	36,6 km ²	Vazão máxima observada (Fev/79) - Período de 1931-1994	4.284 m ³ /s
Comprimento	90 km	Vazão mínima observada (Out/56) Período de 1931-1994	162 m ³ /s
Volume total El.90m	184,6 x 10 ⁶ m ³	Precipitação média anual no reservatório	1.163 mm
NA máximo normal	90,0 m	Evaporação média anual do reservatório	1.224 mm
Na máximo maximorum	92,0 m	Vazão média de longo termo (1931 - 1996)	770 m ³ /s
Profundidade média	5,0 m		
Profundidade máxima	16,0 m		

A Figura 1 apresenta a localização do eixo da UHE Aimorés, implantada na calha do rio Doce.

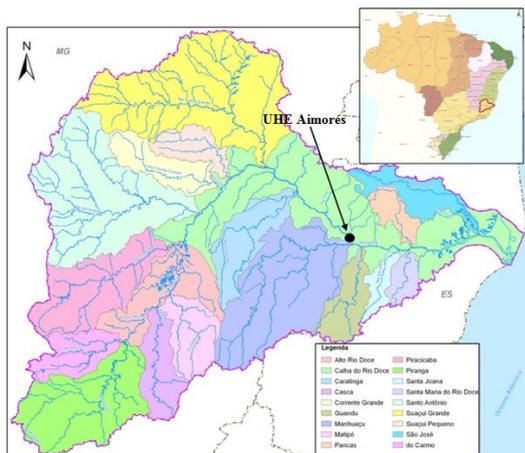


Figura 1 – Bacia do rio Doce e localização da UHE Aimorés. (Fonte: EPE, 2007)

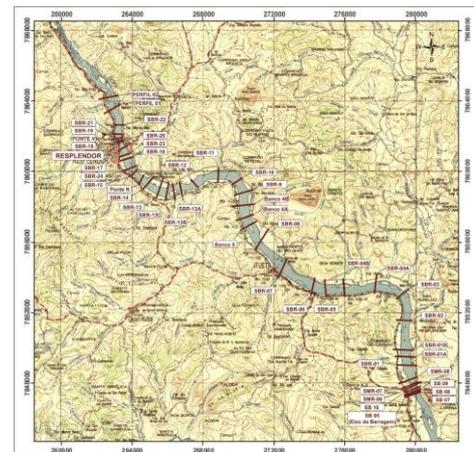


Figura 2 – Localização das seções topobatimétricas. (Fonte: Potamos Engenharia e Hidrologia Ltda., 2012)

Obtenção e tratamento dos dados

Para a composição dos cenários e simulações da evolução dos depósitos de sedimentos no interior do reservatório da UHE Aimorés, foram levantadas seções transversais do reservatório para elaboração do modelo topológico, os posicionamentos das seções ao longo do estirão do reservatório é apresentado na Figura 2. Os dados topobatimétricos foram obtidos através dos estudos realizados pela Potamos Engenharia e Hidrologia Ltda. e foram cedidos pelo Consórcio da Hidrelétrica de Aimorés para a realização dos estudos

Os dados sedimentométricos foram obtidos a partir do inventário das estações sedimentométricas da bacia de contribuição a partir do banco de dados da ANA. Neste contexto, foram identificadas 25 estações com pelos menos uma campanha de medição simultânea de concentração de sedimentos em suspensão e descarga líquida.

Cenários de estudo

A análise do desempenho de cada modelo e a influência de cada parâmetro foi realizada com a comparação dos cenários empreendidos nos estudos e os volumes medidos a partir das campanhas batimétricas. Para cada cenário foram calculados os volumes de sedimentos retidos pelo reservatório a partir do emprego do *software* HEC-RAS, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* do *U. S. Army Corps of Engineers* dos Estados Unidos (USACE, 2010), em sua versão 4.1.0 e o método de redução de área de Borland & Miller.

Cenário de Referência: Utilização Plena dos Dados

Com base nas similaridades das áreas de contribuição e representatividade das descargas líquidas e sólidas afluentes ao reservatório da UHE Aimorés, foi tomada como referência a estação Tumiritinga (56920000), a qual possui série histórica de concentração dos sedimentos em suspensão que se estende desde 1974 e série de vazões a partir de 1972.

Na Figura 3 é apresentada a curva-chave da estação Tumiritinga, que representa a relação empírica entre as descargas líquidas e sólidas totais calculadas pelo método de Colby e calibradas pelo Método Simplificado de Einstein.

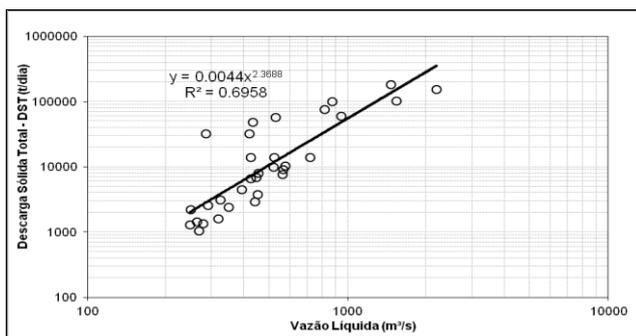


Figura 3 – Curva-chave de sedimentos estação Tumiritinga (56920000)

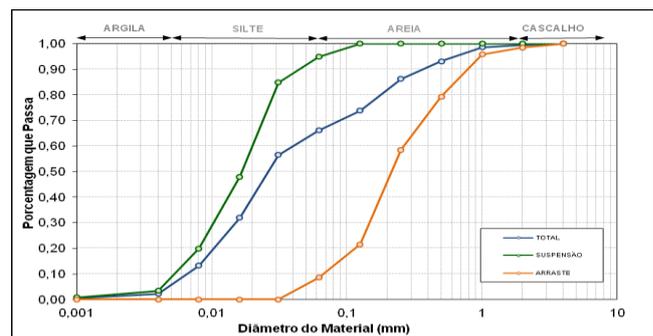


Figura 4 – Distribuição granulométrica dos sedimentos em suspensão, arraste e total.
(Fonte: Potamos Engenharia e Hidrologia Ltda.)

As curvas granulométricas dos sedimentos em suspensão e fundo (Figura 4) foram elaboradas a partir das amostragens e classificação do material do leito e em suspensão. A partir das classificações granulométricas parciais foi elaborada a curva granulométrica total, a qual considera as frações de cada granulometria em suspensão e fundo de acordo com ELETROBRAS (1992).

Cenário de Degradação 1: Curva-chave de sedimentos regionalizada

Consiste no emprego de dados regionalizados a partir das estações sedimentométricas instaladas na bacia do rio Doce em detrimento às informações disponíveis na estação Tumiritinga.

Para a composição deste cenário, foram selecionadas 4 estações dentre as 25 identificadas na área da bacia do rio Doce como potencialmente representativas do comportamento sedimentométrico afluente ao reservatório da UHE Aimorés. A curva-chave obtida a partir da regionalização e utilizada no presente cenário é apresentada na Figura 5.

A distribuição granulométrica dos sedimentos considerada no presente cenário corresponde à composição dos sedimentos amostrados, conforme cenário de referência, apresentada na Figura 4.

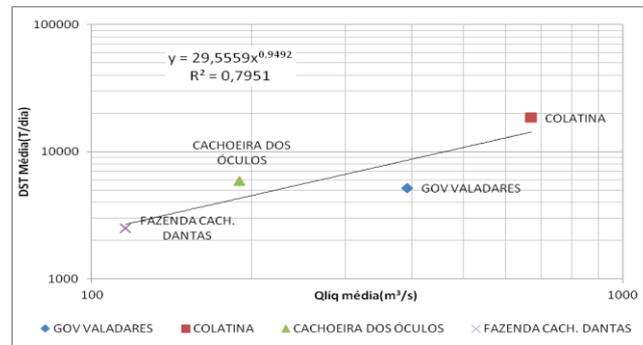


Figura 5 – Curva-chave de sedimentos regionalizada

Cenário de Degradação 2: Distribuição granulométrica estimada a partir da literatura

A principal característica deste cenário é a utilização da distribuição granulométrica a partir dos valores encontrados na literatura, mais precisamente, na publicação “*Diagnóstico das Condições Sedimentológicas dos Principais Rios Brasileiros*” – ELETROBRAS (1992).

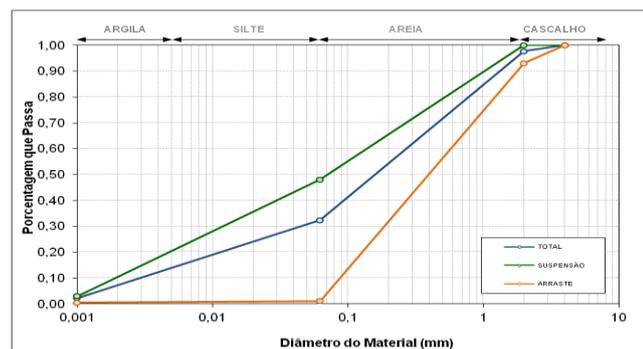


Figura 6 – Distribuição granulométrica dos sedimentos em suspensão, arraste e total. Estação Tumiritinga conforme ELETROBRAS (1992)

A curva-chave utilizada no desenvolvimento deste cenário foi elaborada a partir dos dados registrados na estação Tumiritinga, da mesma forma que utilizada no cenário de referência e apresentada na Figura 3.

Cenário de Degradação 3: Curva-chave regionalizada e distribuição granulométrica estimada

De forma a se representar as condições mais frequentes com as quais se deparam projetistas e pesquisadores da área de sedimentos, foi elaborado o presente cenário, onde é utilizada a curva-chave elaborada com dados regionalizados (Figura 5) e as classificações granulométricas obtidas a partir das informações disponíveis na literatura (Figura 6).

Calibração dos Modelos

Morris & Fan (1998) definem calibração como o processo de ajustar os parâmetros do modelo dentro de um intervalo de valores aceitáveis, para fazer com que este possa reproduzir com precisão as condições observadas.

Foram testadas as combinações entre as formulações para determinação das velocidades de queda e as equações de transporte de sedimentos disponíveis no *software* HEC-RAS. As equações de Yang (1973, 1984) para o transporte de sedimentos e a formulação de Ruby para a velocidade de

queda demonstraram maior aderência aos resultados observados.

O parâmetro de calibração para a aplicação da metodologia por Borland & Miller é a escolha da curva de eficiência de retenção. De acordo com as classificações apresentadas por Pinheiro (2011) e Carvalho (2008), que classificam o reservatório de Aimorés como de grande porte e as recomendações de Strand e Pemberton (1987), utilizou-se a curva de Brune para a determinação das eficiências de retenção e verificação dos resultados a partir da aplicação das curvas envoltórias.

Como resultado desta etapa, a seleção da curva superior, para sedimentos mais grossos, é a mais adequada para as simulações dos depósitos por Borland & Miller.

Resultados da Simulação do Cenário de Referência

Os resultados, expressos pela quantidade de sedimentos retidos pelo reservatório, foram obtidos a partir das diferenças entre os volumes afluentes e efluentes para um dado intervalo de tempo. A evolução temporal dos acúmulos de sedimentos no reservatório determinada a partir do emprego do *software* HEC-RAS é apresentada na Figura 7.

Com a aplicação da metodologia empírica de Redução de Área de Borland & Miller, tem-se que, ao final do período simulado, o reservatório foi capaz de reter um volume de 3,05 hm³.

Resultados da Simulação do Cenário de Degradação 1

A partir da regionalização da curva-chave de sedimentos, foi realizada a simulação do transporte de sedimentos no interior do reservatório de Aimorés. Que resultou em um volume de sedimentos retidos de 3,27 hm³. A evolução dos depósitos de sedimentos para o cenário de **Degradação 1** é apresentada na Figura 7.

De acordo com os resultados obtidos a partir do método Empírico de Redução de Área de Borland & Miller, houve a retenção de um volume de sedimentos da ordem de 2,46 hm³ pelo reservatório de Aimorés no período simulado.

Resultados da Simulação do Cenário de Degradação 2

Considerando-se as distribuições granulométricas dos sedimentos afluentes recomendadas por ELETROBRAS (1992) em detrimento aos dados coletados e classificados do local do empreendimento, tem-se que, ao final do período simulado, o reservatório foi capaz de reter cerca de 4,70 hm³ de sedimentos. A evolução dos depósitos de sedimentos é apresentada na Figura 7.

De acordo com os resultados obtidos a partir do método Empírico de Redução de Área de Borland & Miller, houve a retenção de um volume de sedimentos da ordem de 2,85 hm³ pelo reservatório de Aimorés no período simulado.

Resultados da Simulação do Cenário de Degradação 3

Considerando-se as distribuições granulométricas dos sedimentos afluentes recomendadas por ELETROBRAS (1992) em detrimento aos dados coletados e classificados do local do empreendimento e a regionalização da curva-chave de sedimentos, tem-se que, ao final do período simulado, o reservatório foi capaz de reter cerca de 3,01 hm³ de sedimentos. A evolução dos depósitos de sedimentos é apresentada na Figura 7.

De acordo com os resultados obtidos a partir do método Empírico de Redução de Área de Borland & Miller, houve a retenção de um volume de sedimentos da ordem de 1,84 hm³ pelo reservatório de Aimorés no período simulado.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A comparação dos resultados obtidos pela aplicação das equações de transporte de sedimentos através do *software* HEC-RAS com os volumes de assoreamento determinados pelo método de Redução de Área de Borland & Miller permite uma análise de sensibilidade de cada parâmetro de entrada em ambos modelos. Os resultados dos cálculos e modelagens, para cada cenário e metodologia empregada são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Volumes retidos pelo reservatório (hm³) e porcentagem em relação aos volumes medidos (%). Período de Set 2007 a set 2008

	Cenários			
	Referência	Degradação 1	Degradação 2	Degradação 3
Medido (Batimetria)	4,87			
HEC-RAS	4,87 (99,9%)	3,27 (67,1%)	4,70 (96,4%)	3,01 (61,9%)
Borland & Miller	3,05 (62,6%)	2,46 (40,4%)	2,85 (58,5%)	1,84 (37,7%)

A evolução temporal dos volumes de sedimentos retidos pelo reservatório durante o período simulado, para cada cenário, é apresentada na Figura 7.

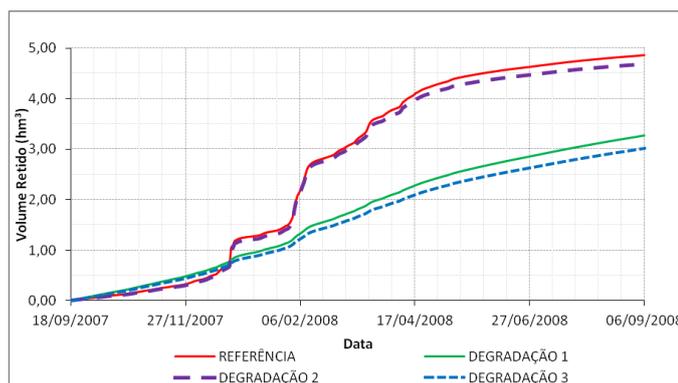


Figura 7 – Evolução temporal dos depósitos de sedimentos para os cenários em estudo. Período entre 18/09/2007 e 06/09/2008

Verifica-se a partir da Figura 8 que a evolução temporal do assoreamento para o cenário **Degradação 2** segue a mesma tendência que o cenário de referência, porém, percebe-se que para os cenários **Degradação 1** e **Degradação 3**, não só os volumes retidos foram inferiores aos medidos, como também, apresentaram comportamento distinto dos demais cenários, apresentado evolução constante ao longo do período simulado.

No que diz respeito às classificações granulométricas dos sedimentos afluentes, os resultados obtidos no cenário **Degradação 2** mostram que a metodologia empírica de Borland & Miller é mais sensível às variações granulométricas para a determinação dos volumes retidos que as modelagens matemáticas para transporte de sedimentos.

CONCLUSÕES

A necessidade da utilização de uma curva-chave de sedimentos que seja efetivamente representativa é evidenciada pelos resultados obtidos por ambas as metodologias dentro dos cenários **Degradação 1** e **Degradação 3**, onde a mesma foi obtida a partir da regionalização dos dados observados em outras estações. Neste cenário, a aplicação da metodologia empírica de Redução de Área e as modelagens matemáticas produziram resultados que subestimaram os

volumes retidos.

Em suma, a principal constatação deste trabalho é a confirmação de que os resultados de simulações de assoreamento de reservatórios com vistas à tomada de decisões são intimamente associados à quantidade e qualidade de dados locais disponíveis. A estimativa da vida útil de um reservatório será tanto mais precisa quanto melhor e maior o banco de dados utilizados. Somente a melhoria e ampliação da rede de monitoramento permitirá o aprofundamento e detalhamento nos estudos sedimentológicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à POTAMOS, CEMIG e VALE pelos dados fornecidos. Agradecem ainda à Pimenta de Ávila Consultoria Ltda. e ao CNPq, Capes e Fapemig pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BORLAND, W. M., MILLER, C. R., (1958) "Distribution of Sediment in Large Reservoirs", *Journal of the Hydrological Division, ASCE*, v. 84.
- CBDB . Comitê Brasileiro de Barragens (2009). *Main brazilian dams III: design, construction and performance*. ICOLD Publications, Brasil. 437p.
- CARVALHO, N. O.(2008). *Hidrossedimentologia Prática*. 2ª ed, Interciência. Rio de Janeiro – RJ. 599p.
- ELETROBRAS (1992). *Diagnóstico das Condições Sedimentológicas dos Principais Rios Brasileiros*. Rio de Janeiro – RJ. Eletrobrás, 99 p.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2007). *Avaliação Ambiental Integrada (AAI) dos Aproveitamentos Hidrelétricos da Bacia do Rio Doce – Relatório Final*. Versão eletrônica disponível em:
http://www.epe.gov.br/MeioAmbiente/Paginas/AAI/MeioAmbiente_7.aspx?CategoriaID=101.
Último acesso em 04 de maio de 2013.
- MORRIS, GREGORY L. and FAN, JIAHUA. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook*. McGraw-Hill Book Co., New York.
- PINHEIRO, M. C. (2011). *Diretrizes Para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração*. ABRH. Porto Alegre – RS. 308p.
- POTAMOS ENGENHARIA E HIDROLOGIA LTDA. (2012). Arquivos de trabalho.
- STRAND, R. I., and PEMBERTON, E. L., 1987. Reservoir Sedimentation. In *Design of Small Dams*. U.S. Bureau of Reclamation, Denver.
- USACE . U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Hydrologic Engineering Center (HEC), Version 4.1, 2010, 417 p.
- USINA DE AIMORÉS. Página da web compilada. Disponível em <http://www.uheaimores.com.br>. Acesso em 23 de março de 2013.
- YANG, C. T., 1973. "Incipient Motion and Sediment Transport," J. Hyd. Div. ASCE, 99 (10): 1679-1704.
- YANG, C. T., 1984. "Unit Stream Power Equation for Gravel," J. Hyd. Div. ASCE, 110 (HY12): 1783-1798.