

## **APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO MORFOLÓGICO DE JULIEN AO TRECHO FLUVIAL DO RESERVATÓRIO DA PCH SALTO PARAOPEBA**

*Vítor Lages do Vale<sup>1</sup>; Sérgio Pinheiro de Freitas<sup>2</sup>;  
Carlos Barreira Martinez<sup>3</sup>; Mary Elma Ferreira Costa<sup>4</sup>*

**RESUMO** --- Este trabalho apresenta a aplicação das equações de equilíbrio morfológico propostas por Julien (1988, 1989) ao trecho fluvial do reservatório da PCH Salto Paraopeba. Os resultados indicaram boa aderência com a geometria atual do reservatório, que se encontra totalmente assoreado e já em equilíbrio morfodinâmico. Em função da convergência dos resultados, sugere-se que estas equações sejam utilizadas também para a calibração de modelos de prognóstico de assoreamento.

**Palavras-chave:** Morfologia, Assoreamento, Reservatórios

## **APPLICATION OF MORPHOLOGICAL EQUILIBRIUM EQUATIONS BY JULIEN ON THE STRETCH OF THE RESERVOIR OF THE HYDROELECTRIC POWER PLANT SALTO PARAOPEBA**

**ABSTRACT** --- This paper presents the application of morphological equilibrium equations proposed by Julien (1988, 1989) to the reservoir of the hydroelectric power plant Salto Paraopeba. The results indicated good adherence with the actual geometry of the reservoir, which is now totally sedimentated and in morphodynamic equilibrium. Due to the convergence of the results it is suggested that these equations can also be used for calibration of sedimentation prediction models.

**Keywords:** Morphology, Sedimentation, Reservoirs

## **INTRODUÇÃO**

O objetivo deste estudo é verificar a aderência das equações de equilíbrio morfodinâmico propostas por Julien (1988, 1989) quando aplicadas a reservatórios que já tivessem atingido seu novo equilíbrio morfodinâmico por meio de seu assoreamento. As equações foram aplicadas ao reservatório da PCH Salto Paraopeba, localizado no rio Paraopeba, a pouco mais de 3,0 km da sede do município de Jeceaba-MG.

---

<sup>1</sup> Mestrando do PPGSMARH / UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil, 31.270-901. e-mail: vitor\_dovale@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Doutorando do PPGGMEC / UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil, 31.270-901. e-mail: opfreitas@ig.com.br

<sup>3</sup> Professor Associado da UFMG, CPH / EHR / Escola de Engenharia, Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil, 31.270-901. e-mail: martinez@cce.ufmg.br

<sup>4</sup> Gerência de Engenharia Civil de Expansão da Geração, Diretoria de Geração e Transmissão, Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig GT, Av. Barbacena, 1200, Santo Agostinho Belo Horizonte - MG, 30190-131, Brasil. e-mail: mary@cemig.com.br

Esta usina entrou em operação em 1956 e em 2000 teve de passar por reformas, visto que o assoreamento havia alcançado a tomada d'água impedindo a continuidade de seu funcionamento. Atualmente a usina encontra-se inoperante, novamente devido ao assoreamento. Nas fotos da Figura 1 pode se observar a cota de assoreamento junto a tomada d'água do empreendimento.



Figura 1 – Assoreamento do reservatório da PCH Salto Paraopeba.

Ao se avaliar o perfil de fundo do reservatório no ano de 2011, apresentado na Figura 2, observa-se a redução da declividade do fundo proporcionada pelo assoreamento. Neste trecho a declividade média encontrada é de 0,01%, enquanto no trecho natural a montante a declividade encontrada é de 0,18%. Destaca-se que o empreendimento foi instalado em um trecho encachoeirado com elevada declividade, possivelmente da mesma declividade do trecho de jusante da barragem (1,93%), comprovando a significativa alteração do leito no trecho do reservatório e a premissa de que o trecho fluvial correspondente ao reservatório já alcançou seu novo equilíbrio morfodinâmico.

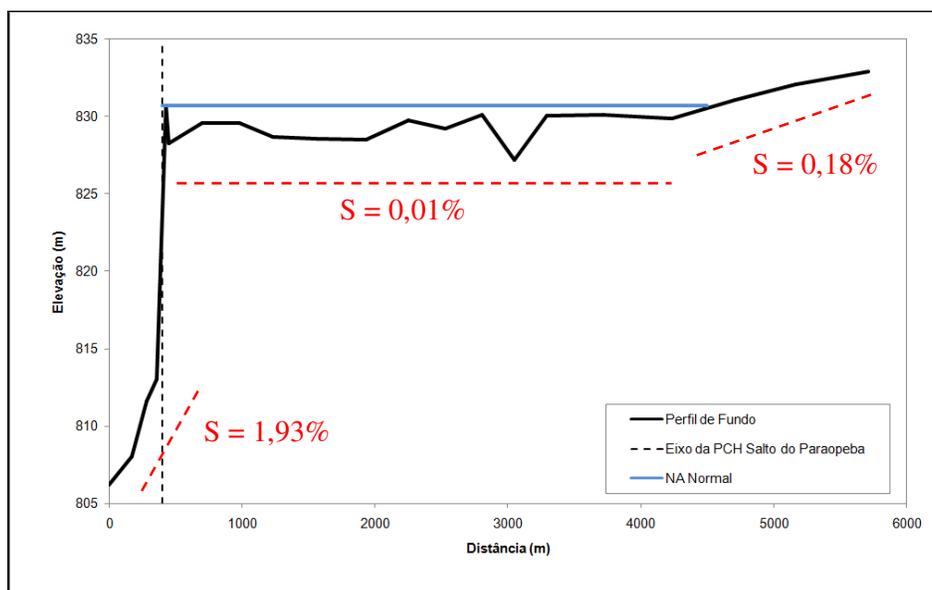


Figura 2 – Perfil de fundo do reservatório da PCH Salto Paraopeba (levantamento topobatimétrico de 2011, SPEC, 2011).

## BASE CONCEITUAL E EQUAÇÕES DE JULIEN

Nos trechos fluviais de canais entalhados em planícies aluviais, ocorre uma interação permanente entre as variáveis descarga sólida e descarga líquida, contrabalançando-se em equilíbrio por meio da declividade do canal e do diâmetro mediano do material transportado no leito (Pinheiro, 2011). Na medida em que há uma alteração brusca de alguma destas variáveis, naturalmente há uma compensação das demais variáveis de modo que o trecho fluvial encontre novamente seu equilíbrio. O equilíbrio ocorre por conta do balanço e conservação de massas, indicando que o volume de sedimentos que aporta à seção de montante de um trecho fluvial tende a se igualar com o volume que sai no extremo de jusante, quando considerada as condições médias de longo termo (FISRWG, 1998).

Em 1955, Lane estabeleceu uma relação qualitativa entre essas variáveis, que pode ser resumida na Equação 1 e no esquema da Figura 3.

$$Q_L \cdot S_0 \propto Q_S \cdot D_{50} \quad (1)$$

Onde:  $Q_L$  é a descarga líquida,  $S_0$  é a declividade,  $Q_S$  é descarga sólida e  $D_{50}$  é o diâmetro médio do sedimento.

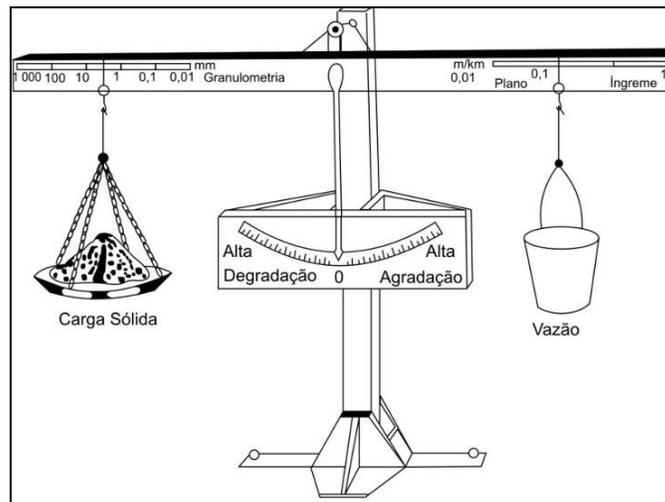


Figura 3 – Representação esquemática da equação de equilíbrio morfodinâmico (Adaptada de FISRWG, 1998).

Um aprimoramento da relação de Lane foi feito por Schumm, em 1969, estabelecendo as relações qualitativas para análise da metamorfose de canais sujeitos à alterações das variáveis características, conforme apresentado a seguir nas Equações 2 e 3 :

- ✓ Redução simultânea da descarga líquida ( $Q_L^-$ ) e da descarga sólida ( $Q_S^-$ ):

$$Q_L^- Q_S^- \sim W^- h^{+/-} \lambda^- S^{+/-} P^+ \quad (2)$$

- ✓ Aumento simultâneo da descarga líquida ( $Q_L^+$ ) e da descarga sólida ( $Q_S^+$ ):

$$Q_L^+ Q_S^+ \sim W^+ h^{+/-} \lambda^+ S^{+/-} P^- \quad (3)$$

Nas relações anteriormente apresentadas, o sinal (+) significa aumento e (-) redução. A letra  $W$  é a largura de topo do canal,  $h$  é a profundidade hidráulica do escoamento,  $\lambda$  o comprimento dos meandros,  $S$  é a declividade e  $P$  a sinuosidade do canal.

No caso da instalação de um barramento, a profundidade hidráulica irá aumentar, reduzindo a declividade de escoamento, proporcionando um desequilíbrio morfodinâmico que será compensado pela redução da declividade do trecho do reservatório e redução do diâmetro do material depositado de modo a restabelecer novamente o equilíbrio.

No entanto, as relações de Schumm são qualitativas, enquanto os estudos conduzidos por Julien (1989, 1989), também apresentadas por Anthony *et al.* (2001), permitiram o desenvolvimento de relações quantitativas para determinar alterações na geometria de canais aluvionares a partir da avaliação da estabilidade do material de fundo. As equações permitem o cálculo da largura, profundidade, velocidade de escoamento e declividade do trecho fluvial em função da vazão dominante e da granulometria do sedimento.

As equações de Julien foram alcançadas a partir da combinação das equações de escoamento uniforme (Equação 4), resistência ao escoamento (Equação 5), tensão de arraste (Equação 6) e Número de Shields (Equação 7), nas quais  $Q$  é a vazão dominante,  $W$  a largura da seção,  $h$  a profundidade de escoamento,  $U$  a velocidade,  $g$  a aceleração da gravidade,  $S$  a declividade,  $\tau_0$  a tensão de arraste,  $\rho$  a densidade da água,  $\rho_s$  a densidade do sedimento,  $R_h$  o raio hidráulico,  $d_s$  o diâmetro médio do sedimento e  $\tau_\theta^*$  o número de Shields.

$$Q = WhU \quad (4)$$

$$U = W \sqrt{8g} \left( \frac{h}{d_s} \right)^m h^{1/2} S^{1/2} \quad (5)$$

$$\tau_0 = R_h \rho g S \quad (6)$$

$$\tau_\theta^* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)gd_s} \quad (7)$$

Destaca-se que do número de Shields depende exclusivamente da profundidade de escoamento para a determinação se a partícula estará em movimento ou não, desta forma, é fundamental que esta variável tenha aderência com os resultados obtidos em campo. Além disto, salienta-se a premissa imposta pela Equação 1, na qual é considerada uma seção prismática para a determinação da vazão dominante, o que poderá implicar em alterações da largura para canais com seções trapezoidais ou triangulares.

## ESTUDO DE CASO

A PCH Salto Paraopeba está implantada no rio Paraopeba com área de drenagem total de aproximadamente 2510 km<sup>2</sup> e possui o rio Brumado como um dos principais afluentes da margem esquerda, cuja contribuição se faz a aproximadamente 3,7 km a montante da PCH e com área de drenagem de 1088 km<sup>2</sup>.

O intervalo do curso de água selecionado para a elaboração do estudo corresponde ao trecho entre a confluência do rio Brumado com o rio Paraopeba e a PCH Salto Paraopeba, cuja extensão é de aproximadamente 3,7 km. Para a obtenção das características do escoamento incluiu-se também o trecho a montante da confluência no rio Paraopeba e Brumado, assim como o trecho de jusante do barramento.

As características do escoamento foram obtidas por meio de estudos de hidráulica fluvial, na qual foi utilizado o modelo HEC-RAS – River Analysis System, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center do U.S. Army Corps of Engineers. Este modelo é aplicado na simulação dos perfis de linha d’água em rios e reservatórios, considerando o escoamento unidimensional, permanente ou não permanente, em regime subcrítico, supercrítico ou misto.

A geometria das seções transversais e o perfil longitudinal foram obtidos no Projeto Básico da PCH (SPEC, 2011), enquanto os coeficientes de rugosidade foram estimados com base nas observações das visitas de inspeção de campo e na comparação com fotografias da referência Hicks (1998), sendo estimado em 0,025. A vazão dominante utilizada corresponde à vazão média de longo termo (MLT), valor definido em função da maior aderência encontrada ao se aplicar as equações de Julien. Para as seções na confluência com o rio Brumado, a vazão foi obtida por correlações com a área de drenagem.

Na Figura 4 é apresentado perfil de escoamento do trecho avaliado, enquanto na Tabela 1 são apresentadas as características hidráulicas do escoamento para cada seção (seções variando de montante para jusante).

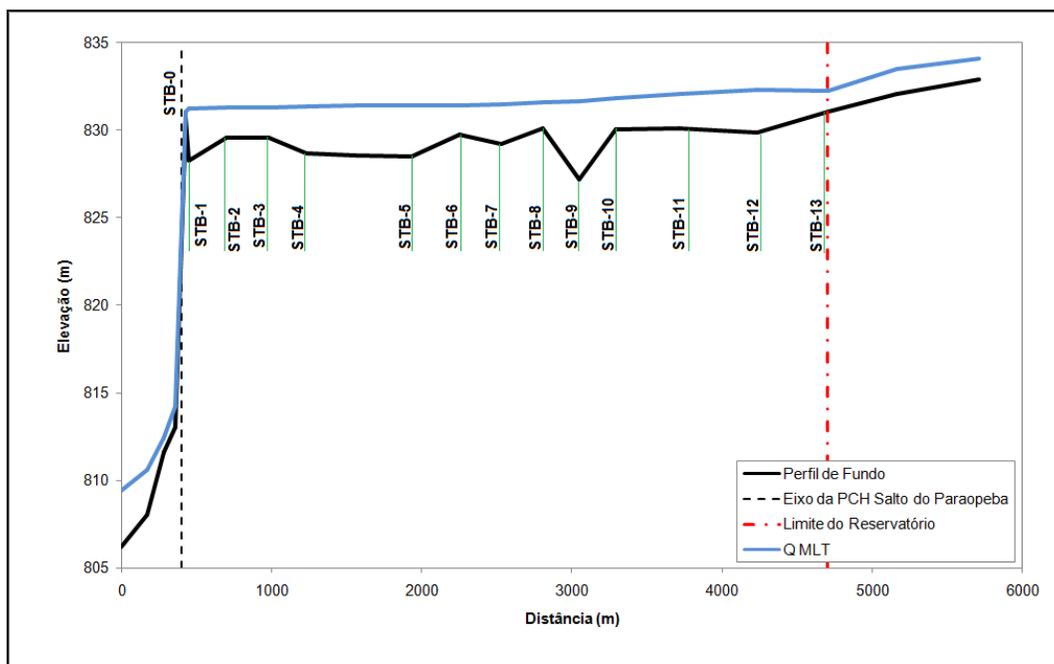


Tabela 1 – Características do escoamento no trecho avaliado (S=0,0001 m/m).

Seção	Largura (m)	Profundidade (m)	Velocidade (m/s)
13	36,86	2,43	0,94
12	29,22	1,93	1,22
11	31,39	1,76	1,24
10	9,73	4,43	1,58
9	41,61	1,47	0,97
8	29,78	2,26	1,05
7	42,62	1,64	0,94
6	56,55	2,91	0,39
5	47,07	2,83	0,68
4	47,63	2,70	0,55
3	55,39	1,77	0,67
2	58,95	1,69	0,65
1	46,45	3,02	0,52
0	68,02	0,37	1,91
<b>Média</b>	<b>42,95</b>	<b>2,23</b>	<b>0,95</b>

De posse das características do escoamento obtidas na modelagem matemática buscou-se uma aderência com as equações propostas por Julien, sendo necessário para sua aplicação a vazão dominante e o diâmetro médio das partículas transportadas. A vazão dominante utilizada foi aquela que gerou maior aderência com a modelagem matemática, sendo esta a  $Q_{MLT}$ , enquanto o diâmetro médio foi definido em função da visita de campo, na qual foi possível caracterizar o material de fundo como sendo predominantemente composto por silte e areia fina, com  $D_{50} = 0,06$  mm, conforme pode ser observado na foto da Figura 5. Na Tabela 2 são apresenta os resultados obtidos. Uma vez que granulometria predominante nos demais trechos fluviais encontrados na região é caracterizada por areia, encontrar material entre silte e areia fina no trecho compreendido pelo reservatório indica a alteração da capacidade de transporte da vazão dominante, o que deverá proporcionar um contrabalanceamento das demais equações da balança de Lane para alcançar o novo equilíbrio.



Figura 5 – Material identificado leito do reservatório.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados indicaram boa aderência para declividade e profundidade, enquanto a largura e velocidade apresentaram maior divergência, conforme pode ser observado na Tabela 3. Destaca-se, porém, que, ao dividir a vazão pela área molhada do escoamento, calculada multiplicando-se  $W$  por  $h$ , partindo da premissa adotada de canal prismático (ver Equação 4), o resultado encontrado (velocidade) para as duas metodologias é similar, sendo 0,50 m/s para os resultados encontrados pelo HEC-RAS e 0,41 m/s para as equações de Julien.

Tabela 3 – Resumo dos resultados obtidos.

Metodologia	Largura (m)	Profundidade (m)	Velocidade (m/s)	Declividade (m/m)	Área Molhada (m <sup>2</sup> )	Q/Área Molhada (m/s)
HEC-RAS	42,95	2,23	0,95	0,00010	95,7	0,50
Julien	55,28	2,09	0,44	0,00011	115,6	0,41

A divergência encontrada para a largura pode estar condicionada às restrições geométricas impostas pela geologia local, a qual é caracterizada por rochas gnáissicas medianamente a pouco alterada, fraturada e em forma de lajeados (SPEC, 2011). Conforme pode ser observado nas fotos da Figura 6, ao longo do reservatório é possível identificar terraços aluvionares às margens do curso d'água, porém, a proximidade das encostas e sua inclinação indicam a presença destas rochas de elevada resistência que condicionam a geometria da calha.

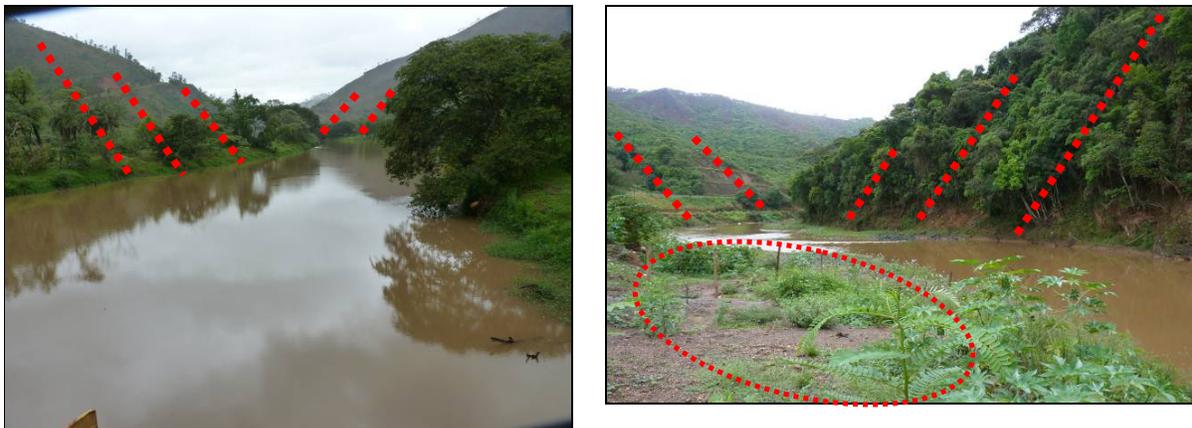


Figura 6 – Entalhamento da calha fluvial do rio Paraopeba ao longo reservatório da PCH Salto Paraopeba.

Como forma de compensar a restrição quanto a largura da calha, as equações proporcionaram o aumento da velocidade de escoamento, mantendo-se, porém, a mesma magnitude da área molhada. Destaca-se que, dentre as equações básicas utilizadas para o desenvolvimento das equações de Julien, está o número de Shields, o qual depende diretamente da profundidade de escoamento ( $h$ ) para a verificação da condição de estabilidade do material depositado no leito. Por isto, os resultados não indicaram o aumento da profundidade, pois com o aumento desta variável, haveria o aumento da tensão de arraste e aumento do  $D_{50}$  do material encontrado no leito fluvial.

Em função da boa aderência encontrada entre os resultados das equações de Julien e a geometria da calha deste reservatório, sugere-se que estes equacionamentos sejam também

utilizados para a verificação das cotas de assoreamento e prognóstico da geometria de reservatórios de empreendimentos a serem implantados, devendo-se sempre realizar ressalvas quanto as restrições da aplicação desta metodologia.

## AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à ANEEL, à CEMIG, à ELETROBRAS FURNAS, a FAPEMIG, CNPq e a VALE pelo suporte financeiro para a realização desse trabalho.

## REFERÊNCIAS

FISRWG (1998). Stream Corridor Restoration: Principles, Process and Practices. FISRWG, USA, 637 p.

HISCKS, D.M., MANSON, D.M. (1998). Roughness Characteristics of New Zealand Rivers. NIWA, ed. LCC, Christchurch, New Zealand, 329 p.

JULIEN, Y. P. (1988). Downstream hydraulic geometry of noncohesive alluvial channels. In Conf. on River Regime, New York, N.Y., pp. 9-16.

JULIEN, Y.P. (1989). Geometrie hydraulique des cours d'eau a lit alluvial. In IAHR Conf. Natural Resource Council, Ottawa, Canada, pp. 9-16.

JULIEN, P. Y. (1994). Erosion and Sedimentation. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 280 p.

JULIEN, P. Y. (2001), River Brings Geomorphologists and Engineers Together. In *Applying Geomorphology to Environmental Management*. Org. por ANTHONY, D. J, HARVEY, M. D., LARONNE, J. B., MOSLEY, M. P., Water Resource Publications, LLC Highlands Ranch, CO, USA, pp. 383 - 395.

LANE, E. W., (1955). Design of Stabe Channels. Transactions ASCE, Vol. 120.

PINHEIRO, M. C. (2011). Diretrizes para a Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração. ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, 308 p.

SCHUMM, S.A. (1969). River Metamorphosis. Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 95.

SPEC (2011). Relatório Final do Projeto Básico – PCH Salto Paraopeba. CEMIG, Belo Horizonte, MG.