

Análise dos parâmetros hidráulicos e determinação das declividades de fundo do rio Jamari por meio da equação de *Manning*¹

Pedro Henrique Lobão², Ivan Felipe Silva dos Santos³ e Antônio Carlos Botan³

¹Aceito para Publicação no 3º Trimestre de 2016.

²Graduando em Engenharia mecânica pertence ao Grupo de estudos em energias renováveis- GEER no Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá (MG), ivanfelipeceice@hotmail.com.

³Mestre em engenharia de energia pertence ao Grupo de estudos em energias renováveis- GEER no Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá (MG).

Resumo

O presente artigo avaliou as correlações entre os parâmetros hidráulicos de um trecho do Rio Jamari, localizado logo a Jusante do barramento da Usina Hidrelétrica de Samuel (UHE Samuel), por meio de dados experimentais e das equações básicas da hidráulica de canais, a saber, a equação de *Manning* e a equação da continuidade. A declividade média do trecho rio foi calculada e diversas correlações entre os parâmetros hidráulicos e geométricos da calha do rio foram desenvolvidas. Os resultados obtidos foram discutidos e demonstram a complexidade da hidráulica fluvial, devido ao grande número de parâmetros envolvidos e as variações espaciais e temporais destes, dado que o rio é um ambiente dinâmico.

Palavras-chave: hidráulica de canais, equação de *Manning*, rio Jamari.

Abstract

This paper evaluated the correlations between the hydraulic parameters of a stretch of the Rio Jamari, located immediately at the downstream of the Hydro Power Plant of Samuel, through experimental data and basic equations of hydraulic channels, namely, Manning's equation and the continuity equation. The average slope of the river was calculated and different correlations between the hydraulic and geometric parameters of the river channel were developed. The results were discussed and demonstrate the complexity of fluvial hydraulics, due to the large number of parameters involved and their the spatial and temporal variations, as the river is a dynamic environment.

Keywords: hydraulic channels, Manning's equation, Rio Jamari.

1. Introdução

Os rios são ambientes extremamente importantes e suas vazões são usadas para usos múltiplos como: abastecimento urbano, lançamento de efluentes, geração de energia hidráulica, irrigação, etc. O Brasil é o país que possui a maior reserva de água doce no mundo (12%) (Nordeste Rural, 2016).

De acordo com Felices (1998) três são as principais ideias que devem orientar o estudo dos rios. São elas: 1) O entendimento que os rios são fontes de riqueza e recursos naturais para o desenvolvimento para a humanidade; 2) A visão de que os rios são elementos naturais dos quais devemos nos proteger (No caso de inundações) e 3) a necessidade de que os rios devem ser protegidos. Contudo ainda segundo Felices (1998) o estudo dos rios não pode ser realizado a parte do conhecimento de outras ciências fundamentais, como por exemplo, a hidráulica tradicional, a hidráulica de canais, a meteorologia e a hidrologia.

Os rios são canais abertos naturais. As características do escoamento em canais abertos (superfície livre) resultam em uma complexa interação entre o fluido e as paredes e leito do canal, envolvendo parâmetros como atrito, gravidade e turbulência (Knight et al., 2005). Tais interações fazem que a geometria do rio seja variável espacialmente e temporalmente, e normalmente são formadas curvas ao longo do seu

curso (meandros), acompanhadas de estreitamentos e alargamentos, alterações de profundidade, etc.

O mecanismo de formação dos meandros compreende a capacidade em erodir, transportar e depositar material do meio fluvial, especialmente em curvas onde o gradiente de velocidade, aliado à conformação física e geológica do leito, causa correntes secundárias com movimento rotacional contra as margens, originando processos erosivos e de deposição (o material é erodido da parte côncava, externa, transportado para jusante e depositado na parte convexa, interna).

O escoamento em rios pode ser analisado utilizando as equações de continuidade (1) e equação de *Manning* (2). Esta equação é uma equação empírica relacionada com as equações da resistência do escoamento (Porto, 2001) e integra parâmetros geométricos e hidráulicos de um trecho de rio.

$$Q = VA \quad (1)$$

$$\frac{\eta \cdot Q}{\sqrt{I}} = A \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

Onde: Q = vazão volumétrica, V = Velocidade média do escoamento, A = área da seção transversal, η = coeficiente de *Manning*, I = declividade do fundo e R_h = Raio Hidráulico = razão entre área molhada e perímetro molhado (Em contato com água) do rio.

O coeficiente η da fórmula de *Manning* não é adimensional e se relaciona com o tipo de revestimento das paredes do rio. A equação de *Manning* é válida para escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugosos de alto número de Reynolds (Porto, 2001).

Dado a importância e a complexidade do tema anteriormente exposto, o presente artigo se propõe a avaliar hidráulicamente e calcular as declividades médias do Rio Jamari por meio de dados experimentais e por meio da equação de *Manning*. Este é um rio da Bacia amazônica, é afluente do rio Madeira. O rio Jamari tem grande significado econômico para Rondônia por ter sido represado para a formação da primeira usina hidrelétrica do Estado, a Usina Hidrelétrica de Samuel.

2. Metodologia

2.1. Caracterização do trecho estudado e medições experimentais

O trecho estudado do rio Jamari é localizado imediatamente após o barramento da UHE Samuel (216 MW) e se estende até o término da região de concessão beneficiária. Abaixo são apresentados alguns dados da região estudada:

- Estudo realizado a Jusante da Usina de Samuel - Rio Jamari (Figura 1).
- Localização: Ferreira Candéias do Jamari, Estado de Rondônia, a 52 km em linha de Porto Velho.
- Dados Hidrológicos: Rio Jamari, Bacia 1 (Amazonas) e Sub-bacia 15.
- Coordenadas da Usina: Latitude: 08°45'00" S Longitude 63°25'00" W



Figura 1: Vista geral do rio Jamari logo à jusante da UHE Samuel.

O trecho do rio Jamari analisado foi ainda dividido em diversos transversais. O número de cada seção transversal e suas respectivas localizações estão apresentados na figura 2.



Figura 2: Localização das seções analisadas do Rio Jamari.

As medições experimentais na região foram realizadas em cada uma das seções transversais da figura 2 por pesquisadores do Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH) da Universidade Federal de Itajubá (MG). As medições realizadas foram: Distribuição de velocidades nas seções e vazão (Utilizando o ADCP – *Acoustic Doppler Current Profiler*) e levantamento dos parâmetros geométricos (Usando um ecobatímetro).

2.2. Análise hidráulica do escoamento e determinação das declividades

No presente trabalho, as características hidráulicas e geométricas do rio, obtidas experimentalmente, serão analisadas por meio da equação da equação de continuidade *Manning* (Equações 1 e 2).

De posse dos dados obtidos em campo, pode-se prosseguir com a determinação das declividades (I) do rio. Isolando-se a declividade I na equação 2 (equação 3). Observa-se nesta equação que, com exceção do coeficiente de Manning η , todos os

fatores associados à declividade puderam ser facilmente determinados por meio dos levantamentos de vazão e batimetria realizados em campo. O coeficiente η por sua vez não é um fator adimensional e possui determinação empírica, sendo inicialmente adotado como sendo igual a 0,035, conforme sugerido por Porto (2001) rios com meandros e bancos pouco profundos em condições regulares- Realidade próxima do rio estudado.

$$I = \left(\frac{\eta Q}{\bar{A} \cdot \bar{R}h^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad (3)$$

Como a equação 3 assume um trecho de rio entre duas regiões com seção transversal constante, e no caso estudado, a seção transversal do rio variava de ponto a ponto, optou-se por calcular a declividade de cada trecho coletado invés de se calcular uma declividade média para todo rio. Para tal foram utilizadas as médias das áreas e perímetros molhados das seções transversais de entrada e saída de cada trecho. Assim sendo, a equação 3 pode ser reescrita da seguinte forma abaixo (4):

$$I_{ij} = \left(\frac{\eta Q}{\bar{A} \cdot \bar{R}h^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad (4)$$

Onde: I_{ij} é a declividade do trecho de rio definido pelas seções i e j ; \bar{A} é a média das áreas molhadas das seções transversais i e j e $\bar{R}h$ é o raio hidráulico médio das seções transversais i e j . Pela aplicação da equação 4, pode-se então proceder com o cálculo da declividade de todos os trechos do rio.

3. Resultados

Realizada por meio da equação de Manning e correlacionadas com os dados locais é possível verificar a seguir, na tabela 1, as declividades de cada trecho bem como os parâmetros utilizados nos cálculos destas. Observa-se na tabela 1 a ocorrência de uma variação de vazões a partir da seção 49. Tal fato é explicado pelo fato dos ensaios nestas seções terem sido realizados em um dia diferente das demais, dia este em que havia menos turbinas em operação e, portanto menor devolução de água do reservatório para a calha do rio.

Pela análise da tabela 1 podemos observar que os valores de declividade estimadas variaram entre 2 e 10 cm/km, sendo o valor final médio igual a 7.17 cm/km. Este valor é coerente dado que é pouco maior a realidade de vários rios da bacia amazônica, cuja declividade é fraca e seus principais afluentes possuem declividade da ordem de 2 a 3 cm/km (Brasil das Águas, 2015). A variação de declividade entre os diversos trechos pode ser explicada por duas razões, que podem ser apresentadas como as limitações da aplicação da equação da *Manning* para cálculo de declividades conforme apresentado no presente trabalho: 1) Pelo método empregado, que considera trechos de rio com áreas transversais constantes e iguais a área média das seções transversais que compõem o trecho, que são na realidade diferentes entre si, e 2) Pelas variações do coeficiente de Manning entre as seções e dentro de uma única seção, dado que consideramos um único valor deste coeficiente para todo rio, contudo, este índice não é constante e varia espacialmente e temporalmente em função das características da seção.

Tabela 1: Resultados de declividade.

Seções	Trecho	V	Q [m ³ /s]	\bar{A}	\bar{P}	\bar{R}_h [m]	I [cm/km]
1 e 2	1	0.89	624.50	705.74	96.10	7.34	6.72
2 e 3	2	0.92	648.69	716.63	89.85	7.98	6.30
3 e 4	3	0.88	638.02	704.05	84.17	8.36	5.92
4 e 5	4	0.95	646.77	629.32	81.41	7.73	8.47
5 e 6	5	1.20	691.66	832.60	91.41	9.11	4.44
6 e 7	6	0.59	640.23	1122.11	105.16	10.67	1.70
7 e 8	7	0.56	648.18	1019.87	116.81	8.73	2.75
8 e 9	8	0.69	611.96	865.03	125.68	6.88	4.68
9 e 10	9	0.75	635.98	810.82	124.51	6.51	6.20
10 e 11	10	0.82	638.58	768.96	120.73	6.37	7.16
11 e 12	11	0.84	640.84	745.45	112.68	6.62	7.29
12 e 13	12	0.87	630.49	718.10	103.80	6.92	7.16
13 e 14	13	0.90	635.16	715.76	103.05	6.95	7.28
14 e 15	14	0.91	655.42	724.48	99.35	7.29	7.09
15 e 16	15	0.90	652.27	707.24	98.92	7.15	7.56
16 e 17	16	0.93	640.77	724.86	105.54	6.87	6.13
17 e 18	17	0.88	665.73	724.65	103.26	7.02	6.42

18 e 19	18	0.92	634.18	698.40	89.48	7.81	7.29
19 e 20	19	0.94	666.44	673.15	80.52	8.36	8.92
20 e 21	20	1.02	651.61	638.82	82.90	7.71	10.30
21 e 22	21	1.04	661.16	649.77	83.66	7.77	10.73
22 e 23	22	0.99	654.12	642.03	79.27	8.10	9.42
23 e 24	23	1.07	666.34	667.21	87.63	7.61	8.16
24 e 25	24	0.91	645.67	742.57	100.41	7.40	6.43
25 e 26	25	0.86	664.91	748.07	89.65	8.34	5.72
26 e 27	26	0.86	623.89	645.11	77.02	8.38	6.74
27 e 28	27	1.16	659.02	807.07	90.39	8.93	4.41
28 e 29	28	0.62	643.30	941.39	108.29	8.69	3.20
29 e 30	29	0.80	666.89	806.08	111.59	7.22	6.00
30 e 31	30	0.83	645.91	755.18	104.63	7.22	6.42
31 e 32	31	0.85	625.45	750.56	96.82	7.75	5.54
32 e 33	32	0.82	629.01	726.15	96.19	7.55	6.21
33 e 34	33	0.94	647.04	637.97	93.92	6.79	9.79
34 e 35	34	1.09	640.50	602.65	82.84	7.27	9.82
35 e 36	35	1.06	654.29	643.14	84.96	7.57	8.53
36 e 37	36	0.96	643.27	636.25	92.18	6.90	9.53
37 e 38	37	1.05	631.21	634.99	92.08	6.90	9.22
38 e 39	38	0.99	658.22	649.08	88.15	7.36	8.79
39 e 40	39	1.04	655.11	651.19	97.38	6.69	9.84
40 e 41	40	0.95	638.84	689.56	110.34	6.25	9.13
41 e 42	41	0.91	640.23	720.46	116.43	6.19	8.52
42 e 43	42	0.86	634.40	752.91	120.41	6.25	7.55
43 e 44	43	0.82	634.21	773.95	103.38	7.49	5.62
44 e 45	44	0.84	655.23	739.58	87.19	8.48	5.56
45 e 46	45	0.93	653.61	681.57	83.51	8.16	6.86
46 e 47	46	1.00	659.66	653.37	81.31	8.04	7.76
47 e 48	47	1.02	656.11	626.99	77.49	8.09	8.26
48 e 49	48	1.09	661.64	607.57	81.52	7.45	9.98
49 e 50	49	0.70	338.83	503.02	83.38	6.03	5.06
50 e 51	50	0.65	337.56	498.49	89.26	5.59	5.67
51 e 52	51	0.70	334.44	475.11	91.22	5.21	6.72

52 e 53	52	0.70	330.23	484.81	96.08	5.05	6.57
53 e 54	53	0.69	345.51	475.60	100.47	4.73	8.13
54 e 55	54	0.75	339.10	458.80	96.17	4.77	8.33
55 e 56	55	0.74	344.02	474.54	93.59	5.07	7.39
56 e 57	56	0.67	323.85	484.54	94.60	5.12	6.20
57 e 58	57	0.72	346.25	478.62	90.28	5.30	6.94
58 e 59	58	0.73	342.90	483.17	94.81	5.10	7.04
59 e 60	59	0.69	338.44	485.67	110.43	4.40	8.26
60 e 61	60	0.71	337.45	475.29	111.74	4.25	8.96
61 e 62	61	0.71	333.66	472.60	108.09	4.37	8.54

De posse dos resultados da tabela 1, podem-se criar correlações entre os parâmetros hidráulicos e geométricos das seções. Nas figuras 3 observamos que conforme a área de cada seção transversal decresce, a velocidade média naquela seção cresce. Tal fato pode ser explicado pelo fato de que seções de áreas menores (Estreitamentos) apresentam em geral maior velocidade do escoamento (Dado que pela equação da continuidade $Q = VA = \text{constante}$).

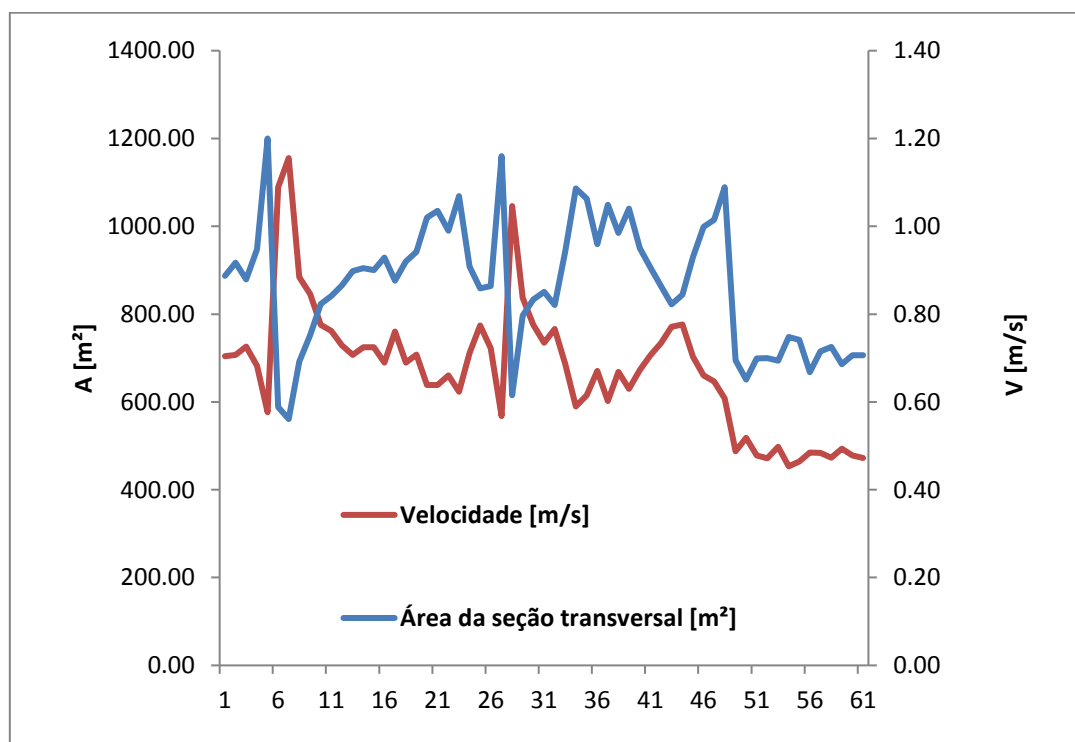


Figura 3: Relação entre velocidade e área da seção.

Nas figuras 4 procura-se obter uma equação para expressão desta relação, sendo obtidas duas curvas, uma para os primeiros ensaios (Até seção 49 – maior vazão) e outra para os ensaios restantes (Após seção 49 – Menores vazões devido desligamento de turbinas na UHE Samuel), do tipo potência com altos índices de correlação ($R^2=0.9811$ e 0.7551). Na figura 4, podemos ver claramente que as tendências das relações entre a velocidade e área variam com a variação da vazão. Tal fato pode ser explicado pelas variações de tendência de variação do raio hidráulico ao longo das seções devido a diminuição do nível ou então pelas variações típicas do coeficiente de Manning com a diminuição do nível, dado que a geometria da calha do rio é variável com o nível, como exemplifica a figura 5, que demonstra a possibilidade de ocorrência de vegetações nas partes superiores de uma seção (Subsec 2 e Subsec 3), alterando o coeficiente de Manning daquela região e portanto de toda seção.

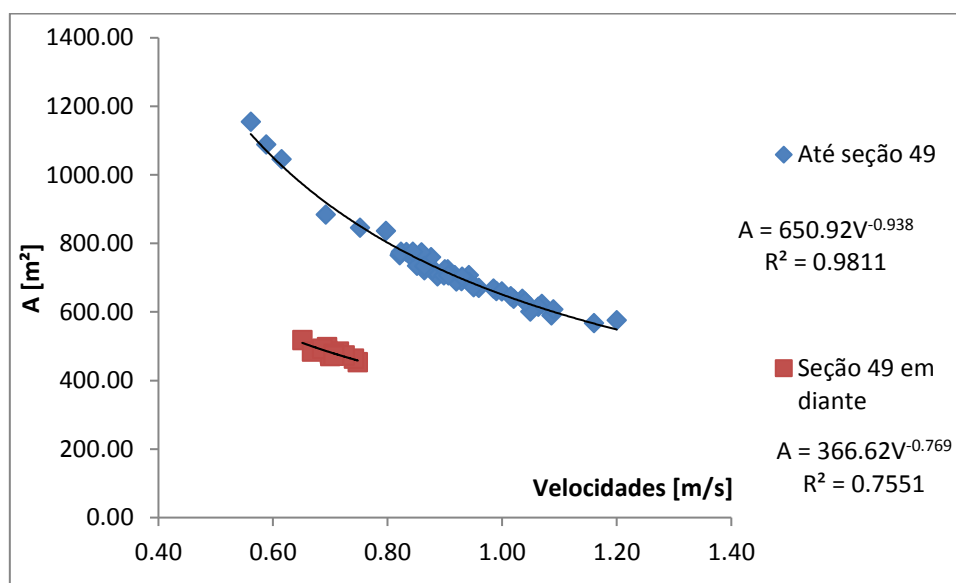


Figura 4: Curva de melhor ajuste para a relação V X A.

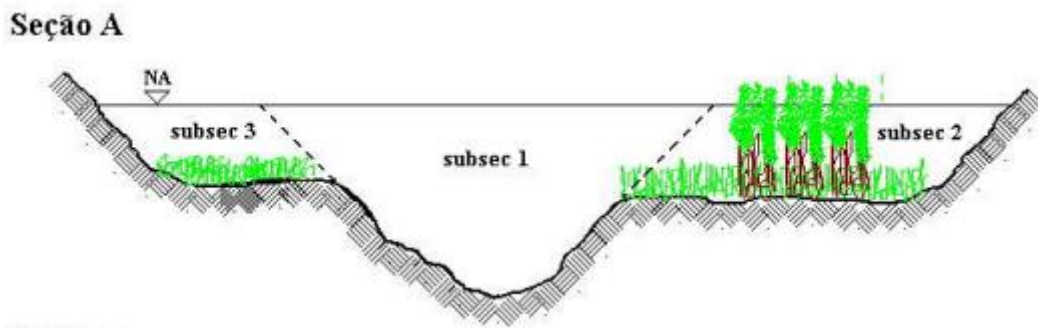


Figura 5: Exemplo de variação dos coeficientes de *Manning* em uma mesma seção. Sefione (2002).

As declividades calculadas foram ainda relacionadas com as áreas médias das seções e com o coeficiente de *Manning* empregado (Figuras 6 e 7). Na figura 6 observamos uma clara correlação decrescente entre declividade e área. Tal correlação pode ser entendida intuitivamente, dado que ambos os fatores são fatores que exercem grande impacto sobre a velocidade. Logo para que a vazão continue a mesma, o crescimento de um deverá implicar em decréscimo do outro, quando mantido constante o coeficiente de *Manning*.

Na figura 7 observamos ainda um grande impacto do coeficiente de *Manning* sobre a declividade média de todo trecho estudado. Uma declividade média de 3 cm/km (Conforme já discutido, declividade típica de rios amazônicos) só seria obtida caso o coeficiente de *Manning* fosse de 0,025. Tal valor é muito pequeno, dado que é o valor mínimo para rios apresentado por Porto (2001), sendo característico de rios limpos, planos e bem regulares, o que certamente não é o caso do rio estudado. Assim sendo conclui-se que os valores de declividades aqui obtidos são superiores a média dos rios amazônicos devido a localização do Trecho do Rio Jamari estudado.

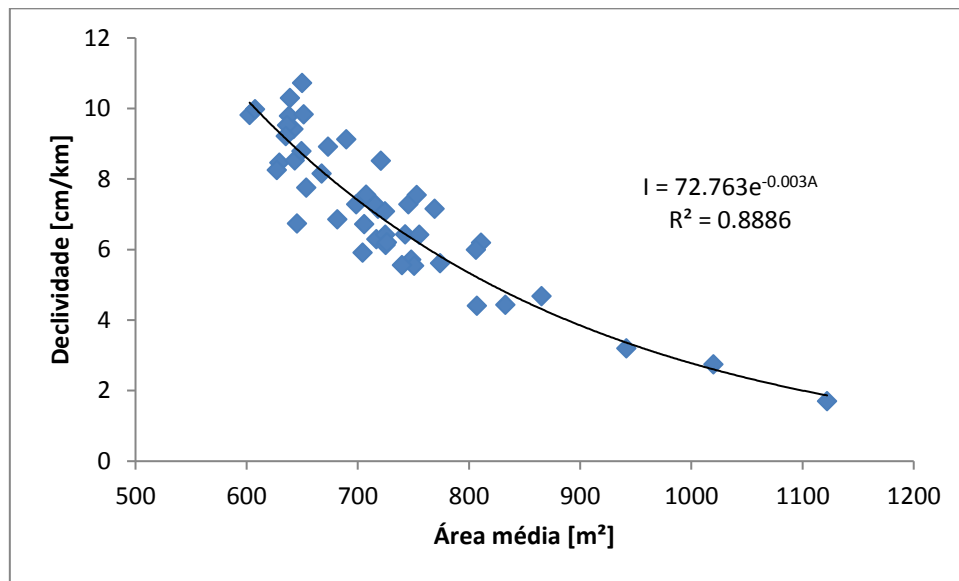


Figura 6: Declividade do trecho em função da área média das seções que o definem.

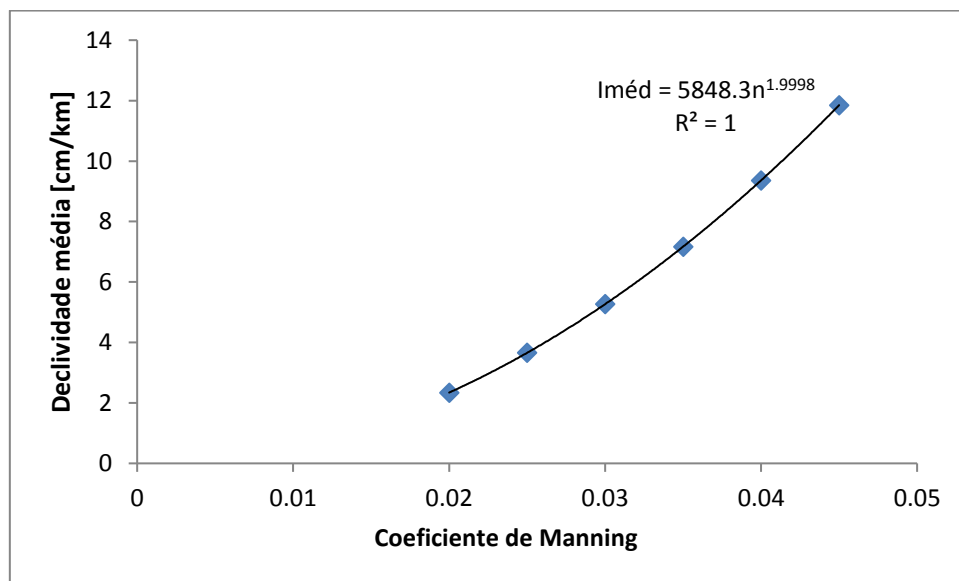


Figura 7: Declividade média de todo trecho analisado em função do coeficiente de *Manning*.

4. Conclusões

O presente artigo avaliou as características e correlações entre os parâmetros hidráulicos do trecho do Rio Jamari, localizado logo após a barragem da UHE Samuel, por meio de dados experimentais e equações características da hidráulica de canais abertos como a equação de *Manning* e a equação da continuidade.

Os resultados obtidos permitiram o cálculo da declividade média do trecho do rio analisado e a percepção de estreitas correlações entre as grandezas hidráulicas dos rios. A declividade média do trecho se mostrou altamente sensível à área média das seções e ao coeficiente de Manning. O trecho do rio analisado com menores vazões demonstrou alta variação das propriedades hidráulicas do que o trecho de maior vazão (No qual as medições foram feitas em um dia diferente, quando haviam mais turbinas ligadas e maior despejamento de água na calha do rio). Tal fato demonstra a complexidade do estudo fluvial, pois as características desse variam fortemente com a variação de vazões nas estações. Grandezas como coeficiente de *Manninge* raio hidráulico são grandemente alteradas com variações do nível de água na calha.

As correlações aqui obtidas podem ser replicadas para qualquer rio, pois permitem um entendimento mais profundo da hidráulica fluvial deste, permitindo a comparação com outros trechos de rios.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CERPCH (Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas) pelos dados experimentais cedidos para confecção do presente trabalho.

6. Referências

FELICES, A.R. Introduccion A LA Hidraulica Fluvial.Universidad Nacional de ingenieria. Lima, Peru, 1998.

KNIGHT, D.W. WRIGHT, N. G. ET AL. “Guidelines for applying commercial CFD software to open channel flow”.JUL., 2005.
PUBLICADO EM <[HTTP://WWW.NOTTINGHAM.AC.UK/CFD/OCF/GUIDELINES.PDF](http://www.nottingham.ac.uk/cfd/ocf/guidelines.pdf)>.

NORDESTE RURAL <[HTTP://NORDESTERURAL.COM.BR/OS-PRINCIPAIS-RIOS-BRASILEIROS-E-A-IMPORTANCIA-DELES-PARA-AS-COMUNIDADES/](http://nordeste-rural.com.br/os-principais-rios-brasileiros-e-a-importancia-deles-para-as-comunidades/)>. ACESSADO EM 11/05/2016.

SEFIONE, A. L. Estudo comparativo de métodos de extrapolação superior de curva chave. Universidade Federal de Rio Grande do Sul (Dissertação de mestrado em Engenharia), 2002.

PORTO, R. M. HIDRÁULICA BÁSICA. 2º EDIÇÃO. EESC USP – PROJETO REENGE, SÃO CARLOS, SP, 2001.