

## PARÂMETROS HIDRÁULICOS PARA QUANTIFICAÇÃO DE VAZÃO SÓLIDA EM ESCOAMENTOS FLUVIAIS, ESTUDO DE CASO NO RIO JUNDIAÍ, ESTADO DE SÃO PAULO

*Diniz Ferrarezi Neto<sup>1</sup>; Stéphanie Caroline Pereira C. Medeiros<sup>2</sup>; Luis Fernando Murillo Bermudez<sup>3</sup> & André Luís Sotero Salustiano Martim<sup>4</sup>*

**ABSTRACT** – Quantifying the solid flow of a river is probably one of the most complex problems in river hydraulics. The problems involving the transport of sediments are diverse and their consequences generate environmental and financial losses. Some examples are the silting up of reservoirs and lakes, damage to hydraulic structures by abrasion, catalysis and transportation of chemicals, in addition to potentiating problems caused by pathogens such as bacteria and viruses. In view of the importance of studying sediment transport, the methodology applied in this work proposed to relate concepts from different areas involved with engineering, more specifically river hydraulics relationships, hydrometry and topography data collection techniques. The objective of this work is the determination of hydraulic parameters of river flows, aiming at their application in indirect methods of quantification of the solid flow. The work was carried out in a cross section of the Jundiaí River, located in Campo Limpo Paulista, State of São Paulo, Brazil.

**Palavras-Chave** – Transporte de sedimentos, Parâmetros hidráulicos, Descarga sólida.

1) Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, d196125@dac.unicamp.br, (19) 3521-2304

2) Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, s187181@dac.unicamp.br, (19) 3521-2304

3) Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, luismurillo@fec.unicamp.br, (19) 3521-2304

4) Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, sotero@fec.unicamp.br, (19) 3521-2304

## 1 - INTRODUÇÃO

O transporte fluvial de sedimentos, como é apontado por Christofolletti (1981), naturalmente é dado pela ação das vertentes, fatores hidrológicos, topografia, estruturas geológicas, uso do solo e cobertura vegetal da região que se localiza o curso d'água. Em menor escala, é influenciado pela ação erosiva da água sobre o fundo e margens. De acordo com Carvalho *et al.* (2000) a erosão responsável pela geração das partículas sólidas, o transporte e deposição das mesmas, compõe um processo natural e por diversas vezes benéfico, porém, os sedimentos interferem na qualidade da água e em sua possibilidade de utilização. O consumo humano, industrial e energético é afetado, e em diversos casos a própria vida aquática.

Sugiuo e Bigarella (1979) defendem que os sedimentos particulados são divididos nas categorias de fundo e suspensa, a primeira está restrita ao leito, composta de elementos como areia e cascalho, movimentadas através das forças tangenciais proporcionadas pela corrente, envolvendo a saltação e o rolamento. Já as partículas suspensas são movimentadas de maneira independente do leito, tratando-se de partículas com granulometria inferior, como argila e silte.

Alguns exemplos de problemas relacionados com o transporte fluvial de sedimentos que demonstram a importância dos estudos voltados ao tema são descritos por Carvalho *et al.* (2000) e Poleto (2008), como assoreamento, danos em estruturas hidráulicas através da abrasão, atuação dos sedimentos como catalizadores e carreadores de poluentes, além da proliferação de bactérias e vírus.

Carvalho (2008) expõe que quantificar a vazão sólida de um rio é provavelmente um dos problemas mais complexos da hidráulica fluvial, sendo que uma solução para enfrentar essa dificuldade é a utilização de técnicas de medição indireta. Estas consistem em realizar amostragens de água e sedimentos misturados, quantificando o transporte de sedimentos através cálculos posteriores aos trabalhos de campo. Embora o autor apresente uma gama de métodos voltados à quantificação, todos possuem a necessidade de receber como dados de entrada alguns parâmetros hidráulicos e sedimentométricos, ou seja, a determinação destes parâmetros é indispensável na aplicação das relações de quantificação indireta do transporte de sedimentos.

Deste modo, o estudo visa a determinação de parâmetros hidráulicos para escoamentos fluviais (área da seção transversal, perímetro molhado, raio hidráulico, profundidade média, largura da seção do canal, declividade da linha de energia, velocidade do fluxo e coeficiente de rugosidade) buscando a aplicação destes em métodos indiretos de quantificação da vazão sólida, tomando como estudo de caso uma seção transversal do rio Jundiaí, estado de São Paulo.

## 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

As medições foram realizadas na parte alta da bacia hidrográfica do rio Jundiá, que faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – Piracicaba, Capivari e Jundiá (UGRHI N°5 /PCJ). Trata-se de um afluente do Rio Tietê, com bacia contida inteiramente no estado de São Paulo e com área de aproximadamente 1114 km<sup>2</sup>.

A coleta de dados foi realizada em uma seção transversal localizada no município de Campo Limpo Paulista entre Outubro de 2019 e Janeiro de 2020, totalizando 6 visitas de campo. Esta se localiza à montante de uma estação de tratamento de água, sob uma passarela de pedestres, cujas coordenadas aproximadas são 23°12'29.1"S 46°45'59.2"W.

O método empregado tomou como hipótese a possibilidade de conciliar conceitos de diferentes áreas relacionadas a engenharia, uma vez que a coleta de dados se baseou em relações disponíveis na topografia, mais precisamente planimetria e taqueometria, que podem ser encontradas respectivamente em Silva e Segantini (2015) e Borges (1977), hidrometria, cujas orientações de trabalho em campo foram extraídas de Santos *et al.* (2001), além da hidráulica fluvial, ao se aplicar as hipóteses e propriedades de um escoamento tido como uniforme, disponível em Porto (2006). O trabalho realizado por Hora (1996), destinado a avaliar o transporte de sedimentos na sub-bacia do Ribeirão do Rato, noroeste do Paraná, foi utilizado como base para este projeto.

Para a execução dos trabalhos considerou-se que a seção escolhida atende alguns requisitos, como uniformidade do escoamento, pois as coletas se realizaram em períodos reduzidos e sem grandes variações de vazão, um trecho retilíneo à montante e jusante da seção, evitado perturbações e fenômenos mais complexos de serem estudados, além é claro, da facilidade de acesso ao local possibilitando instalar todos os equipamentos necessários para a coleta de dados.

A declividade da linha d'água, que devido a uniformidade do escoamento possui a mesma inclinação da linha de energia, se mostrou o parâmetro de maior complexidade de determinação, sendo que os conceitos e equipamentos topográficos alocados foram destinados para a obtenção desse parâmetro.

O método consiste em adotar um sistema de coordenadas relativo com origem próxima a seção transversal do rio. Na origem instalou-se um teodolito eletrônico (MED), e a partir do mesmo foi realizado uma série de visadas, cujos pontos levantados situam-se ao longo da margem do rio, tanto à montante quanto à jusante da seção de estudo, sendo que um dos pontos levantados deve estar localizado junto à seção transversal. Através da taqueometria e da planimetria foram determinadas as coordenadas relativas dos pontos levantados. A relação entre o desnível e a distância entre o ponto localizado na seção e os demais resulta em uma série de declividades, sendo a média destes a adotada para a seção. A Figura 1 apresenta um esquema representativo da coleta

de dados utilizando teodolito e equipamentos relacionados para a determinação da declividade da linha d'água. Ela apresenta também um esquema representativo da seção transversal, além de alguns dos parâmetros hidráulicos a serem determinados.

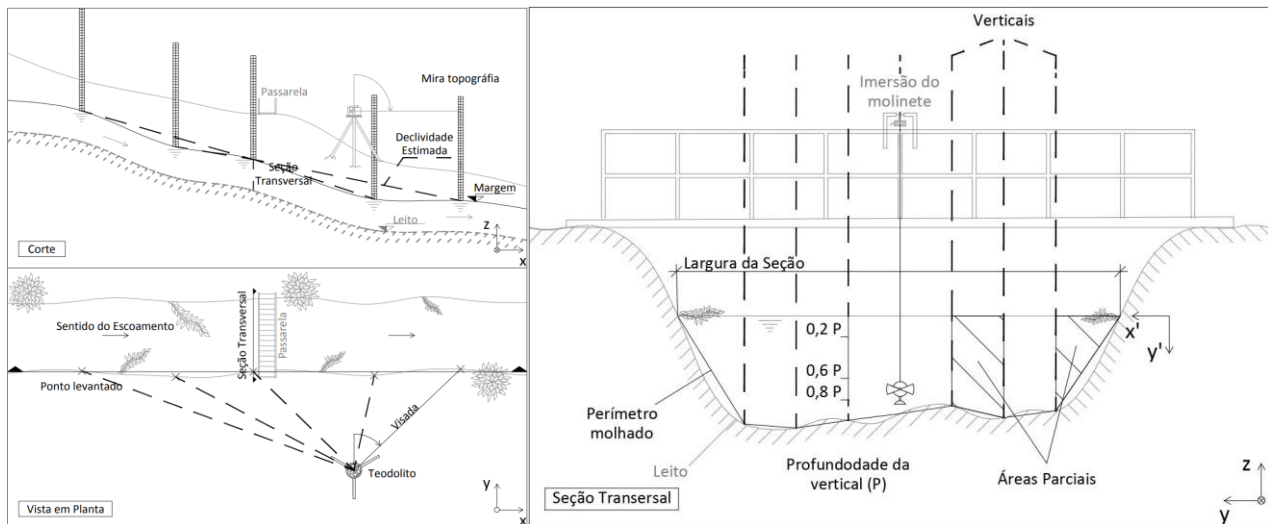


Figura 1 – Esquema representativo das medições topográficas e hidrométricas na seção transversal (Fonte: Autoria própria).

Quanto a hidrometria, foi adotado o Método da Seção Média para estimar a área e a vazão da seção transversal, que se baseia na divisão da seção em áreas parciais, sendo que a soma das mesmas resulta na estimativa total. O mesmo princípio se aplica à vazão, determinada pela soma dos produtos entre as áreas parciais as médias das velocidades das verticais que as compõe. Sendo assim, o método necessita que a velocidade do escoamento seja estimada ao longo da seção transversal, ou seja, de uma margem a outra, a cada meio metro. Para isso foi realizada a imersão de um molinete através de verticais, a velocidade foi avaliada em 3 pontos para cada vertical (20%, 60% e 80%).

Aproveitando-se das imersões do molinete, foi estimado o perímetro molhado da seção. Para isso foi adotado novamente um sistema de coordenadas relativo, com origem na margem junto à seção transversal. Levando em conta os pontos onde as verticais de imersão coincidem com o leito e o espaçamento entre as mesmas, determina-se incrementos de perímetro através da distância entre os pontos, sendo que a somatória dos incrementos fornece o perímetro molhado total.

Um parâmetro de simples determinação, mas de grande importância é a profundidade média da seção, calculada pela divisão entre a área molhada e a largura da seção transversal, que por sua vez é determinada diretamente com uma trena. Uma possibilidade de aplicação para esse parâmetro é a composição da curva chave da seção transversal.

A equação clássica de Manning, disposta em Porto (2006), Baptista e Lara (2010), apresentada na Equação 1, foi utilizada no cálculo do coeficiente de rugosidade ( $n$ ). A determinação deste valor

está propensa a erros e incertezas múltiplas (POWELL, 2014; PHILLIPS;TADAYON, 2006). Comparar o valor obtido a partir do método de Cowan (1944) apresentado em Chow (1959), foi a opção adotada para a verificação dos resultados.

$$\frac{nQ}{\sqrt{I}} = AR^{2/3} \quad (1)$$

Onde  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning,  $Q$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] a vazão,  $I$  [ $m \cdot m^{-1}$ ] a declividade da linha da água,  $A$  [ $m^2$ ] a área molhada e  $R$  [ $m$ ] o raio hidráulico.

O Método de Cowan considera o canal estável, e se baseia no uso de 6 parâmetros com intervalos tabelados para determinar  $n$ , relacionando-os da maneira apresentada na Equação 2.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \quad (2)$$

Onde  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning,  $n_0$ , o parâmetro referente ao material do canal (valor base),  $n_1$  referente às irregularidades da superfície,  $n_2$  referente à variação da forma da seção,  $n_3$  referente as obstruções,  $n_4$  parâmetro referente à vegetação na seção e  $m_5$  parâmetro referente à sinuosidade do canal.

Para o cálculo do  $n_0$ , dependente do tamanho dos sedimentos que conforma o perímetro molhado, podem ser empregadas fórmulas empíricas que relacionam esta granulometria e outros parâmetros hidráulicos (profundidade e raio hidráulico) com o valor de  $n_0$  ou valores comparados com o diâmetro médio do sedimento de fundo tabelados em Phillips e Tadayon (2006). Neste estudo, foi utilizado o amostrador Rock Island na mesma seção do rio para a coleta de material do leito em três verticais que posteriormente foram integradas e analisadas seguindo a norma ABNT 7181 de 2016 para a determinação da granulometria.

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com exceção do Método de Cowan (1944), o procedimento descrito anteriormente foi aplicado para cada visita de campo realizada em Campo Limpo Paulista, não sendo numerosas devido as condições adversas encontradas no ano de 2020 e limitações financeiras do projeto. A Tabela 1 apresenta os resultados encontrados após processar as informações obtidas nos trabalhos de campo.

O diâmetro médio ( $d_{50}$ ) do material do leito na seção de estudo foi determinado em relação às curvas granulométricas de três amostragens em 0,6 mm. Devido que não é possível a aplicação de formulas que relacionam o material do leito com o  $n_0$ , por ser em sua maioria restritas para rios onde apresentam-se tamanhos maiores do que areias Lang et al. (2004), optou-se por relacionar os valores tabelados por Phillips e Tadayon (2006), definindo um coeficiente de rugosidade base de 0,023.

Tabela 1 – Parâmetros hidráulicos determinados.

Data da Coleta	Declividade d'água m/m	Área da seção transversal m <sup>2</sup>	Profundidade média m	Perímetro molhado m	Raio hidráulico m	Velocidade média m/s	Vazão m <sup>3</sup> /s	Coefficiente de Manning
01/10/2019	0,0003218	8,048	1,041	9,166	0,878	0,108	0,871	0,151905
24/10/2019	0,0003920	6,655	1,081	7,771	0,856	0,087	0,576	0,206285
12/11/2019	0,0002687	6,480	1,211	7,133	0,909	0,112	0,723	0,137879
27/11/2019	0,0002869	6,198	1,221	7,622	0,813	0,099	0,611	0,149794
12/12/2019	0,0007689	8,913	1,087	9,866	0,903	0,171	1,525	0,151421
16/01/2020	0,0007040	7,992	1,095	8,754	0,913	0,166	1,330	0,150053

Com este valor e a estimação dos outros parâmetros a partir das características do trecho estudado foi calculado o coeficiente de Manning pelo Método de Cowan. A Tabela 2 apresenta os valores adotados no procedimento, destacando que o parâmetro com maior influência é a obstrução pela vegetação presente no canal.

Tabela 2 – Coeficiente de rugosidade de Manning através do Método de Cowan (1944).

Parâmetro	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$m_5$	$n$
Valor adotado	0,023	0,010	0,005	0,010	0,100	1,000	0,148

Anteriormente a este projeto foi realizado outro trabalho envolvido com a temática de transporte de sedimentos na seção de estudo, no caso o de Mathi *et al.* (2018), porém este não possui o foco em parâmetros hidráulicos, além disso, pesquisas relacionadas com rio Jundiá não são numerosas como a de outros cursos d'água dentro da própria bacia PCJ.

Levando em conta a escassez de informações, dois meios foram encontrados para averiguar a qualidade dos resultados obtidos. O primeiro é se basear no coeficiente de rugosidade de Manning. Como é apresentado por Porto (2006), o valor de 0,15 é adotado para rios com margens espraçadas com muita vegetação e más condições de conservação. Os resultados apontam para esse valor e de fato, a descrição apresentada na bibliografia se encaixa com as encontradas em campo.

A segunda maneira envolve comparar os dados de vazão fornecidos pelo Sistema de Alerta a Inundações do Estado de São Paulo (SAISP), referentes a uma a seção próxima ao local de estudo e os determinados com as técnicas de hidrometria. A Tabela 3 e a Figura 2 trazem a comparação entre a vazão calculada e a média das vazões fornecidas SAISP durante o horário de coleta dos dados, sendo possível observar a proximidade dos valores encontrados.



Tabela 3 – Comparação de vazões.

Data da Coleta	Vazão SAISP m <sup>3</sup> /s	Vazão Calculada m <sup>3</sup> /s	Desvio %
01/10/2019	0,843	0,871	3,3
24/10/2019	0,507	0,576	13,5
12/11/2019	0,665	0,723	8,7
27/11/2019	0,664	0,611	-8,0
12/12/2019	1,603	1,525	-4,8
16/01/2020	1,783	1,330	-25,4

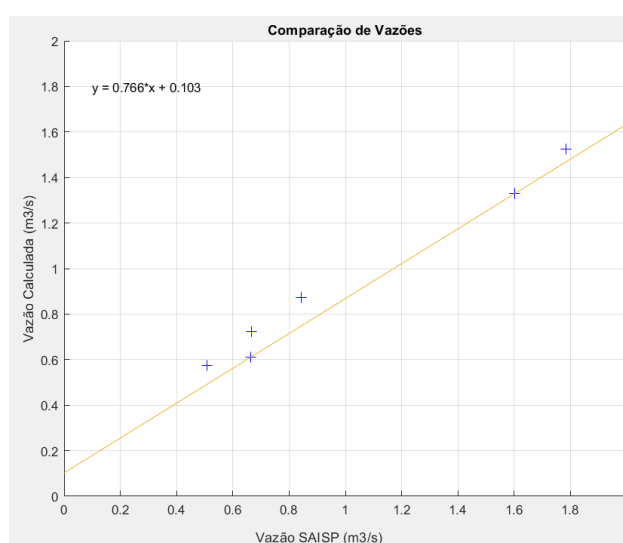


Figura 2 – Comparação de vazões (Fonte: Autoria própria).

## 4 - CONCLUSÕES

Tendo em vista a coerência entre os resultados obtidos e a compatibilidade entre os campos relacionados, conclui-se que o objetivo foi atingido. Trata-se de um fato muito importante, uma vez que gera a possibilidade de avaliar a vazão sólida de um rio através de métodos indiretos, utilizando-se de um procedimento simples e que dispensa a coleta de dados hidrométricos em mais de uma seção transversal. Além disso, os resultados podem ser aplicados na validação de outros estudos, como o de Mathi *et al.* (2018), por exemplo.

**AGRADECIMENTOS** – Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido, através da bolsa de iniciação científica (IC) para o primeiro autor. Agradecimento especial para todos os professores, técnicos, familiares e amigos que prestaram apoio logístico durante a realização deste trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. *NBR 7181: Solo - Análise granulométrica*, versão Corrigida 2:2018, 12 p.
- BAPTISTA, M. B.; LARA, M. M. L. (2010). *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*. 3 ed. UFMG, Belo Horizonte, MG, 473 pp.
- BORGES, A. C. (1977). *Topografia Aplicada à Engenharia Civil, Vol. 1*. 2. ed. Edgard Blucher, São Paulo/SP, 212 p.
- CARVALHO, N. O.; FILIZOLA Júnior, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. (2000). *Guia de Práticas Sedimentométricas*. Brasília, DF. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília/DF, 103 p.
- CARVALHO, N. O. (2008). *Hidrossedimentologia Prática - 2ª ed.* Interciência, Rio de Janeiro/RJ, 321p.
- CHOW, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Co. New York, 680 pp.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1981). *Geomorfologia Fluvial*. Editora Edgard Blucher, São Paulo/SP, 313 p.
- HORA, M. A. G. M. da. (1996). “*Avaliação do Transporte de Sólidos na Sub-Bacia do Ribeirão do Rato, Região Noroeste do Estado do Paraná*”. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.
- LANG, S.; LADSON, T.; ANDERSON, B.; RUTHERFURD, I. (2004). “*A Review of Empirical Equations for Estimating Stream Roughness and their Application to Four Streams in Victoria*”. Australian Journal of Water Resources. V.8(1), p. 69–82.
- MATHI, L. K.; MARIANO, T. B.; MARTIM, A. L. S. S. (2018). “*Rio Jundiá - Bacia do PCJ: Determinação da correlação entre sedimentos em suspensão e turbidez NTU*” in anais do in Anais do XIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Vitória/ES, Set 2018.
- PHILLIPS, J. V.; TADAYON, S., 2006, *Selection of Manning’s roughness coefficient for natural and constructed vegetated and non-vegetated channels, and vegetation maintenance plan guidelines for vegetated channels in central Arizona: Investigations Report 2006–5108*. U.S. Geological Survey Scientific, Reston, 41 p.
- POLETO, C. (Org.). (2008). *Ambiente e Sedimentos*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre/RS, 404 pp.
- PORTO, R. M. (2006). *Hidráulica básica*. 4. ed. EESC, São Carlos/SP, 519 pp.
- POWELL, M. (2014). “*Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research*”. Earth-Science Reviews., V.136, p.301-338.
- SILVA, I.; SEGANTINI, P. C. L. (2015). *Topografia para engenharia: Teoria e prática de geomática*. 1. ed. Elsevier, Rio de Janeiro/RJ, 432 pp.
- SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. (2001). *Hidrometria aplicada*. Instituto de tecnologia para o desenvolvimento, Curitiba/PR, 372 pp.
- SUGUIO, K; BIGARELLA, J. J. (1979). *Ambiente Fluvial*. Editora da Universidade Federal do Paraná: Associação de Defesa e Educação Ambiental, Curitiba/PR.