

UTILIZAÇÃO DO VELOCÍMETRO ACÚSTICO DOPPLER PARA AVALIAÇÃO DE TURBULÊNCIA DO ESCOAMENTO E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

Helenesio C. B. Cabral¹ & Cristiane Pacheco² & Pablo W. Valcorte³ & Daniela G. Sanagiotto^{4*}

Resumo – O Velocímetro Acústico Doppler, ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), é um equipamento para medição da velocidade da água de forma indireta, através da medição da velocidade do movimento das partículas presentes na água, através do efeito Doppler. O equipamento permite que sejam avaliadas velocidades em três componentes com frequências de até 50Hz. Pelas características do equipamento e pelo princípio de funcionamento do mesmo, pesquisas tem sido realizadas com o objetivo de obter outras informações a partir do uso do ADV, como a avaliação da turbulência do escoamento e estimativas de concentração de sedimentos em suspensão. Nesse trabalho, busca-se mostrar os trabalhos mais recentes nesse sentido, além de apresentar resultados de um estudo experimental conduzido para avaliar características turbulentas do escoamento utilizando um ADV. A análise dos resultados indica que há perspectivas boas para o uso do ADV para avaliação da turbulência do escoamento, mas que a utilização de filtros nos dados é fundamental para excluir o ruído das amostras. Dos filtros analisados, o que melhor se ajusta é o *Phase-Space Thresholding Method*, proposto por Goring & Nikora (2002), que é capaz de excluir o ruído do sinal, mantendo a maior quantidade de dados da amostra original.

Palavras-Chave – Velocímetro acústico Doppler, Turbulência, Sedimentos

USING ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER FOR EVALUATING TURBULENCE PARAMETERS AND SUSPENDED SEDIMENTS CONCENTRATION

Abstract – Acoustic Doppler Velocimeter, ADV, is an equipment used for velocity measurements in an indirect way through the measurement of particles velocities moving in the water, from the Doppler effect. This equipment allows evaluating 3-D velocities with frequencies up to 50 Hz. Considering the velocimeter characteristics and the working principle, some researches have been conducted in order to obtain more than just velocities, as the evaluation of turbulence parameters and suspended sediments concentration estimation. In this paper, some recent studies conducted in this area were summarized besides showing some results of an experimental study conducted with the purpose of evaluating turbulence parameters by ADV data. The results indicate that there are good perspectives to ADV use to evaluate turbulence parameters, but it is necessary to apply some filtering process to eliminate part of the data noise. Considering the filters analyzed, the *Phase-Space Thresholding Method*, proposed by Goring & Nikora (2002), is the one that remove the noise maintaining the major part of the original data.

Keywords – Acoustic Doppler Velocimeter, turbulence, Sediments.

¹ Mestrando do PPGEC da UFSM. E-mail: helenesio@yahoo.com.br

² Acadêmica de Eng. Sanitária e Ambiental/ UFSM. E-mail: crishpacheco@gmail.com

³ Acadêmico de Eng. Civil/ UFSM. E-mail: pvalcorte@gmail.com

⁴ Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Av. Roraima, 1000 - Bairro Camobi - CEP.: 97105-900-Santa Maria/RS - Prédio 10 - CT - Sala 540 – E-mail: dsanagiotto@gmail.com

INTRODUÇÃO

O ADV é um equipamento que mede a velocidade das partículas presentes na água através do princípio do efeito Doppler, utilizando transdutores acústicos receptores e transmissores. O transmissor gera um pequeno pulso de som de frequência conhecida, que se propaga na água ao longo do eixo deste feixe. Como o pulso passa pelo volume de medição, a energia acústica é refletida em todas as direções pelas pequenas partículas presentes na água. Parte da energia refletida volta através do eixo receptor, onde é feita a medição da mudança da frequência pelo ADV.

Este deslocamento na frequência medido pelo receptor é proporcional à velocidade das partículas. Outra variável medida pelo equipamento é a SNR (“signal-to-noise ratio”), que representa a relação sinal-ruído. Esta relação é medida em decibel (dB), e corresponde à diferença entre o nível do sinal recebido e o nível de ruído inerente ao processo de transmissão da informação.

Essas características do equipamento e das medições realizadas com seu uso, tem sido objeto de algumas pesquisas, que visam extrair informações além dos valores de velocidades médias ou instantâneas. Essas informações referem-se à avaliação da turbulência do escoamento e a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS).

Portanto este trabalho tem como objetivo verificar a possibilidade do uso desse equipamento para avaliação de CSS e de turbulência do escoamento, bem como os cuidados necessários ou limitações.

UTILIZAÇÃO DO ADV PARA ESTIMATIVA DE CSS

O avanço tecnológico e científico trouxe algumas possibilidades para facilitar a análise de sedimentos. Hoje em dia, para avaliar a CSS são utilizados turbidímetros, equipamentos ultrassônicos, velocímetros Doppler. No entanto, o uso de alguns desses equipamentos ainda encontra-se em fase de pesquisa, como o ADV.

De acordo com (Ha *et al.*, 2009), o ADV pode ser um instrumento útil para estimar a CSS, embora sua principal função seja de medir a velocidade do fluxo em um ponto fixo. Para converter com precisão a potência do sinal recebido a CSS, as seguintes questões devem ser abordadas: (1) a um condicionador de sinal de ADV parece ter pelo menos duas relações de amplificação selecionadas automaticamente para permitir os sinais amplificados encaixarem-se de uma gama pré-selecionada; (2) o sinal de dispersão refletido do ADV teria muito ruído para enfrentar as mudanças instantâneas da CSS devido à alta amplificação da definição do equipamento e volume de amostragem pequena. Assim, de acordo com esses pesquisadores, para ter melhores respostas ao usar o ADV para medir a CSS para sedimentos coesivos, deve-se selecionar um equipamento com o comprimento de onda que esteja próxima do tamanho das partículas de sedimentos, se possível.

Gratiot *et al.* (2000), em seu trabalho sobre o ADV para a caracterização de turbulência na concentração de sedimentos em suspensão, destacam as investigações em áreas estuarinas e coesas, onde a ocorrência de leito perto de camadas em que as concentrações de até 200 g l^{-1} , pode ser medida. Essas camadas de sedimentos também podem ser chamadas de Concentração de Bentônicos em Suspensão (CBS). Onde são separadas por uma interface nítida a partir da camada superior da água onde a suspensão do sedimento é diluído, destacando a importância da CBS para o transporte de sedimentos coesivos.

Outros trabalhos conduzidos com o objetivo de associar medições obtidas com o ADV para a CSS tem sido realizados, entre eles, pode-se citar: Salehi & Strom (2011) e Brown & Chanson (2013).

UTILIZAÇÃO DO ADV PARA AVALIAÇÃO DA TURBULÊNCIA DO ESCOAMENTO

A avaliação de características turbulentas do escoamento através de medições com o ADV representa um item de grande interesse pela maior parte dos pesquisadores na área. A parte turbulenta do escoamento pode ser representada pelas flutuações da velocidade em relação ao valor médio. As medições através do ADV apresentam ruído Doppler, que é inerente ao processo, estando este relacionado com a distribuição aleatória das partículas que compõem cada valor de velocidade medida. Por isso, para a correta avaliação das características turbulentas é necessário que seja identificado no sinal medido às flutuações decorrentes do próprio escoamento e as provenientes do ruído. Segundo Lohrmann *et al.* (1994), nem sempre é possível prever as magnitudes do ruído antes da realização das medições, porque sempre há um grau de incerteza em relação às condições “reais” do escoamento.

Durante a aquisição dos dados de velocidade, são armazenados, para cada instante os valores de SNR (“*signal-to-noise ratio*”). O nível de ruído N é medido no início de cada sequência de medição e é aproximadamente igual ao nível de ruído eletrônico para o ADV. Sendo I o sinal medido, a relação sinal-ruído – SNR – pode ser definida a partir da equação (1). Os valores de SNR estão relacionados à quantidade de partículas suspensas na água. Assim, um valor mais elevado de SNR indica a existência de maior concentração de partículas, que resulta em medições de melhor qualidade.

$$SNR = 10 \log_{10} \left[\frac{I}{N} \right] \quad (1)$$

Nos experimentos de Lohrmann *et al.* (1994) verificou-se que um valor de SNR de 15 dB é suficiente para obter dados com níveis aceitáveis de ruído para a frequência de aquisição de 25 Hz. Para a frequência de 1 Hz, o valor de 5 dB é suficiente.

Nikora e Goring (1998) propuseram uma técnica para a estimativa do ruído Doppler presente nas medições com o ADV. A proposta dos autores consiste em um procedimento bastante simples: primeiro são realizadas as medições de velocidade instantânea no escoamento em questão, depois as componentes do ruído seriam obtidas em uma porção em repouso da água utilizada no experimento e este ruído seria retirado do sinal original, para então avaliar os parâmetros de turbulência.

Também Nikora e Goring (1998) verificaram que o espectro e a distribuição de probabilidades indicam que o ruído Doppler é um ruído branco de comportamento Gaussiano, com maiores níveis de ruído para as componentes horizontais da velocidade. Também se observou que o tipo de partículas presentes na água altera os níveis de ruído, por exemplo, os autores acreditam que a presença de bolhas de ar poderia aumentar entre 4 e 5 vezes a magnitude das componentes do ruído. Um problema apontado pelos próprios autores na utilização deste método consiste no fato de que uma das fontes de ruído não é reproduzida, que é a turbulência de pequena escala, não resolvendo completamente o problema da eliminação do ruído do sinal. Os autores afirmam que o ruído provoca grandes diferenças nas avaliações de energia da turbulência, do coeficiente de assimetria e do coeficiente de curtose, principalmente para as componentes horizontais, mesmo para escoamentos com altos níveis de turbulência.

Em 1999, Lemmin e Lhermitte, criticaram o trabalho de Nikora e Goring (1998), em uma discussão do referido artigo. Os mesmos são enfáticos no fato de que o ruído Doppler é função da velocidade da água e que medições na água em repouso não necessariamente representam a magnitude do ruído Doppler para situações da água em movimento.

Outros estudos vêm sendo realizados com o intuito de avaliar os erros cometidos ao se obter parâmetros de turbulência a partir de medições de velocidade utilizando o ADV, bem como há

diversas proposições de aplicação de filtros aos dados, com o objetivo de eliminar os efeitos do ruído.

Alguns filtros são bastante simples e consistem em retirar da série de dados os que apresentam determinados valores de SNR ou correlação, que se encontram fora das faixas recomendadas pelos fabricantes. Outros filtros são mais elaborados, como o que foi desenvolvido por Goring e Nikora (2002) e tem sido bastante utilizado pelos usuários de ADV.

Goring e Nikora (2002) apresentam um método para detectar os “spikes” nas séries de velocidades obtidas com o ADV. Este método é chamado pelos autores de “Phase-Space Thresholding Method” - PSTM. Neste método, os pontos são graficados de tal maneira que as variáveis e derivadas destas são confrontados entre si. Após podem ser traçadas envoltórias, que delimitam os dados que podem ser aproveitados dos dados que representam ruído.

METODOLOGIA

Conforme destacado anteriormente, o objetivo desse trabalho é avaliar a possibilidade de utilização do ADV para usos não convencionais, entre eles: estimativa de parâmetros de turbulência do escoamento e avaliação da CSS. Dessa forma, nessa fase, apresenta-se a primeira parte do trabalho, onde se avaliou experimentalmente o uso do ADV para avaliação de parâmetros de turbulência.

Na sequência comenta-se sobre as características do aparato experimental, os procedimentos experimentais e de análise dos dados.

Aparato Experimental

Para a realização dos ensaios utilizou-se de um canal, com geometrias especiais que permitiam a criação de regiões com diferentes tipos de escoamento, quanto às velocidades e características da turbulência. O canal é alimentado por uma tubulação que, com o auxílio de uma bomba da marca KSB, operada em conjunto com um inversor de frequência (marca Weg, série CFW-09), leva a água de um reservatório inferior até a entrada do canal (parte mais elevada), em um circuito fechado.

As medições de velocidade foram realizadas com um ADV (Figura 1a). O equipamento utilizado realiza as medições de velocidade em um volume localizado a, aproximadamente, 5 cm da sonda emissora, com valores das três componentes cartesianas e com uma frequência máxima de aquisição de 50 Hz.

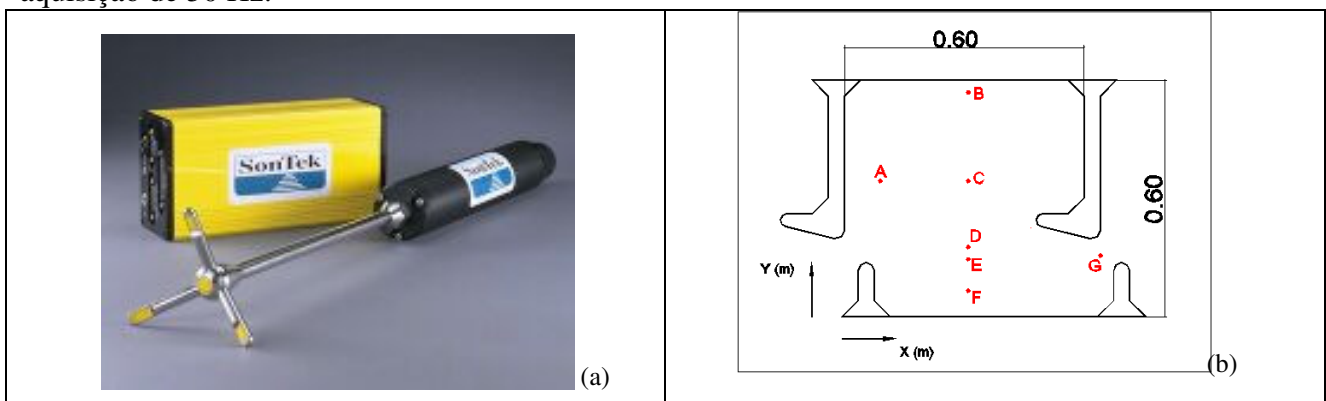


Figura 1 – (a) ADV utilizado nas medições de velocidade; (b) Esquema dos pontos.

Procedimentos Experimentais

Em uma etapa preliminar realizaram-se testes para definir os parâmetros de realização das medições, como frequência de amostragem e tempo. A partir desses ensaios preliminares concluiu-se que a faixa nominal de ± 250 cm/s, que corresponde a uma máxima componente horizontal de ± 360 cm/s e a uma máxima vertical de ± 90 cm/s, é a mais adequada. A frequência de amostragem foi definida em 50 Hz, com aquisições de 90 s em cada posição, totalizando 4500 dados por ponto.

Foram selecionadas 7 regiões para análise e em cada região realizaram-se medições de velocidades em 5 planos paralelos ao fundo do canal, um deles próximo ao fundo (1 cm do fundo), e os outros afastados do fundo 10%, 25%, 50% e 80% da profundidade média do escoamento (h_m), totalizando 35 pontos (Figura 1b).

Durante a realização dos ensaios foi medida a temperatura da água, sendo esta informada no programa de aquisição de dados. A salinidade não foi medida, sendo considerada igual a zero para todos os ensaios realizados.

Para o posicionamento do equipamento no interior do tanque de medição construiu-se um carrinho móvel sobre o canal que permite que o ADV seja deslocado horizontalmente (longitudinal e transversalmente) e verticalmente e que este fique fixo em determinada posição.

Procedimentos de Tratamento dos Dados

De acordo com as recomendações do fabricante do equipamento e dados obtidos na literatura, foram selecionados alguns filtros para serem testados nas amostras, sendo definidos os seguintes:

- Correlação > 30%
- Correlação > 50%
- Correlação > 50% e SNR > 10
- Correlação > 70%
- Correlação > 70% e SNR > 15 (recomendado pelos fabricantes)
- “Acceleration” – recomendado para séries com baixos valores de Correlação e SNR normal.
- “Communication errors” – recomendado para eliminar problemas que podem ocorrer em medições em campo.
- PSTM – proposto por Goring e Nikora (2002) e Wahl (2003), conforme apresentado na revisão bibliográfica.
- Correlação > 50% e PSTM.

Foram calculados os valores médios de velocidade e alguns parâmetros indicativos da turbulência do escoamento, como energia cinética da turbulência e tensões de Reynolds (descrito em Sanagiotto, 2007), para as amostras originais e para as amostras após o processo de aplicação dos filtros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para fins de apresentação de resultados, selecionou-se um dos pontos localizados dentro do canal (Figura 1b), para as cinco diferentes profundidades, para se apresentar o comportamento de parâmetros de turbulência do escoamento calculados a partir da amostra original e das amostras após passarem pela aplicação dos filtros. A Figura 2, apresenta os resultados de energia cinética da turbulência e de tensões de Reynolds no plano xy, de forma comparativa a partir da amostra original e das amostras que passaram pelos diversos filtros. Na Figura 2c, também se apresenta o percentual da amostra mantida após o processo de aplicação do filtro.

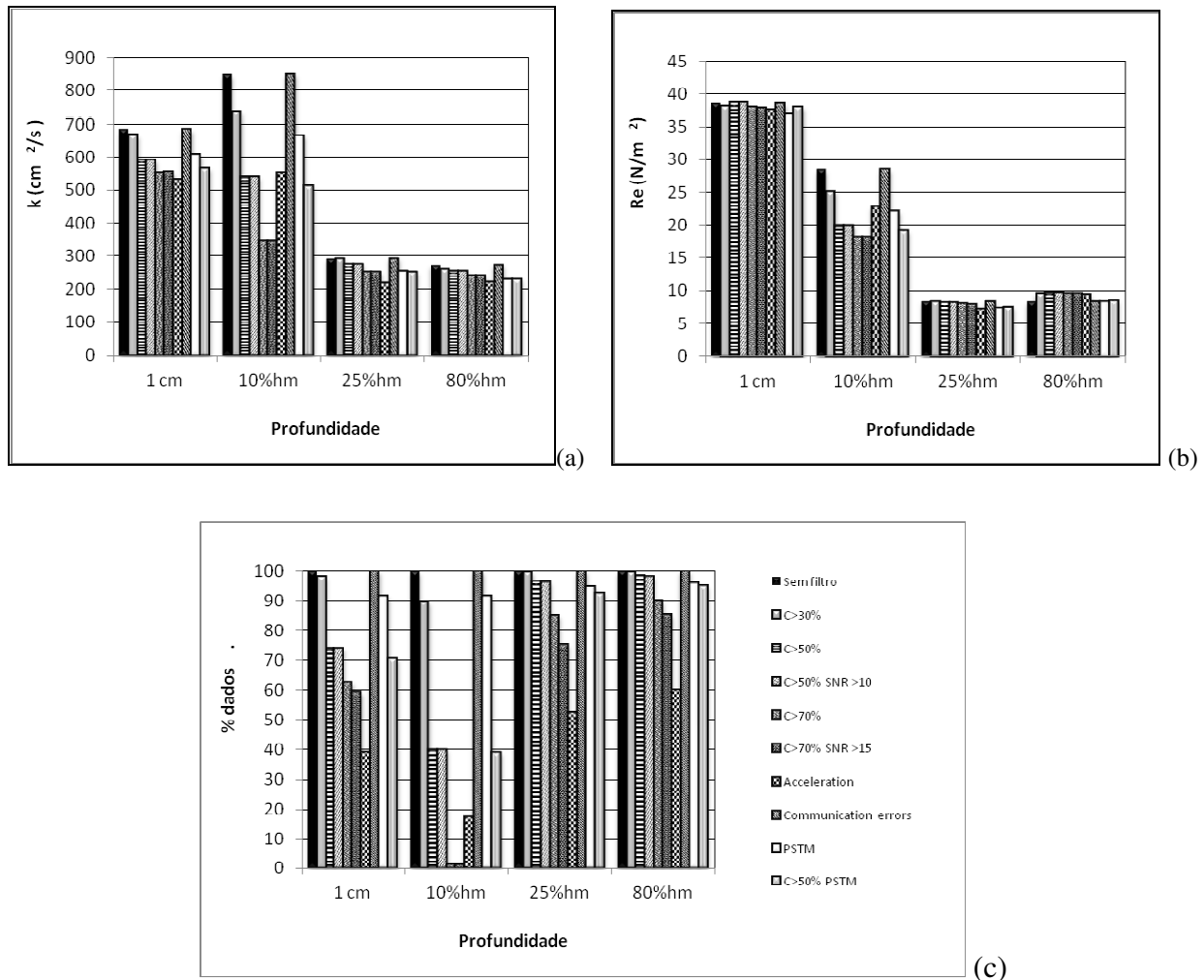


Figura 2 - Resultados obtidos na posição G para diferentes profundidades do escoamento: (a) Energia cinética da turbulência; (b) tensão de Reynolds no plano xy e (c) Percentual de dados mantidos após a aplicação de cada um dos filtros.

A análise da figura 2 permite explicar o padrão de comportamento encontrado nos demais ensaios. Observa-se que os resultados da energia cinética da turbulência sofrem alterações elevadas quando comparados os valores obtidos com a amostra original (sem filtro) com os valores calculados a partir dos dados filtrados. Já para a tensão de Reynolds no plano xy, tem-se que esse parâmetro é menos sensível aos tratamentos aplicados aos dados.

Dentre os filtros aplicados, considera-se que o proposto por Goring & Nikora (2002) é o mais adequado, pois consegue extrair o ruído das amostras, sem descartar dados excessivamente. Alguns filtros utilizados, retiram muitos dados, que a princípio parecem ser uma perturbação natural do escoamento e não um ruído.

Verificou-se a partir da análise de todos os pontos que sem a aplicação dos filtros, tem-se valores de energia cinética da turbulência até 20% superiores em comparação com a mesma avaliação realizada a partir da série filtrada (filtro PSTM). As tensões de Reynolds no plano xy, chegam a ser até 15% superiores sem a aplicação do filtro.

CONCLUSÕES

Na literatura foram encontrados diversos trabalhos que buscam avaliar a possibilidade do uso do ADV para outros fins, além das medições de velocidade. Verificou-se a partir da análise dos mesmos, que há boas perspectivas para o uso do equipamento para avaliações de turbulência do escoamento e para a estimativa da CSS. No entanto, os autores mencionam as limitações e incertezas da utilização do ADV para estes fins, o que indica a necessidade da continuidade de pesquisas nesse sentido.

Nos ensaios realizados, procurou-se avaliar parâmetros de turbulência, a partir de medições com o ADV, em um escoamento caracterizado por um certo grau de agitação e, em alguns casos, com ar incorporado. Essas condições são apontadas pelo fabricante como limitantes na utilização do equipamento. As medições obtidas com o ADV apresentam ruído branco, e, para as condições apresentadas, as interferências no sinal são aumentadas.

Acredita-se que os erros pessoais e metodológicos possam ser praticamente insignificantes, já que o produto final destas medições é apresentado como campos de determinados parâmetros, conforme apresentado por Sanagiotto (2007), e assim, erros grosseiros poderiam ser verificados facilmente. Deste modo, a avaliação das incertezas de medições, teve o enfoque nos erros provenientes dos instrumentos. Neste sentido, optou-se pela utilização de filtros, com o objetivo de eliminar principalmente os chamados “spikes” da série temporal. A escolha do filtro, baseou-se na literatura, e no estudo comparativo com outros tipos de filtros.

No entanto, conforme verificado neste trabalho e apresentado na literatura, não se pode afirmar que a aplicação deste processo de filtro reduza todos os efeitos do ruído do sinal, e assim, sejam eliminados todos os erros na avaliação destes parâmetros. Mesmo que se comparem os resultados obtidos com o ADV, com dados provenientes de outras técnicas de medições (como o LDV), sabe-se que todo processo de medição possui erros e o conhecimento do valor “real” em muitos casos não é possível.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS pela estrutura oferecida para a realização da parte experimental pela última autora.

REFERÊNCIAS

- BROWN, R., and Chanson (2013). Turbulence and suspended sediment measurements in an urban environment during the Brisbane River flood of January 2011. *In Journal of Hydraulic Engineering*, v. 139, p. 1943.
- FUGATE, D.C., FRIEDRICH, C.T., (2002). Determining concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST. *Continental Shelf Research* 1867-1886, pp. 22.
- GRATIOT, N., MORY, M., AUCHERE, D., (2000). An acoustic Doppler velocimeter (ADV) for the characterisation of turbulence in concentrated fluid mud. *Continental Shelf Research*, v. 20, pp. 1551-1567.
- GORING, D.G and NIKORA, V.I. (2002). Fluctuations of suspended sediment concentration and turbulent sediment fluxes in an open-channel flow. *In Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128 (2), pp. 214-224.

- HA, H., HSU, W.-Y., MAA, J.-Y., SHAO, Y., HOLLAND, C., (2009). Using ADV backscatter strength for measuring suspended cohesive sediment concentration. *Continental Shelf Research* 29, pp. 1310-1316.
- LEMMIN, U., LHERMITTE, R. (1999). Discussion of “ADV Measurements of Turbulence: Can We Improve Their Interpretation?” by Nikora, V. I. y Goring, D. G. *In Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125. 1999, n. 9, pp. 987-988.
- LOHRMANN, A., CABRERA, R., GRAUS, N. C. (2000). Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for laboratory use. In. *Anais of the ASCE Conference on Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*, Buffalo, New York, 1994, pp. 351–365
- MANNING, A. J., DYER, K.R., (1999). A laboratory examination of flocc characteristics with regard to turbulent shearing. *Marine Geology* 160 (1–2), pp. 147-170.
- MOATE, B.D., THORNE, P.D., (2009). Measurements and inversion of acoustic scattering from suspensions having broad size distributions. In *Journal of the Acoustical Society of America* 126 (6), pp. 2905-2917.
- NIKORA, V.I., and GORING, D.G. (1998). “ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?” *In Journal of Hydraulic Engineering*, v. 124 (6), pp. 630-634.
- SALEHI, M. and K. STROM. (2011). Using velocimeter signal to noise ratio as a surrogate measure of suspended mud concentration, *Cont. Shelf Res.*, 31, pp.1020-1032
- SANAGIOTTO, D. G. (2007). Análise da macroturbulência do escoamento em escadas para peixes por bacias sucessivas. Tese de doutorado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. 293 p.
- THORNE, P.D., HANES, D.M., (2002). A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. *Continental Shelf Research* 22 (4), pp. 603-632.
- WAHL, T. L. (2003). “Discussion of ‘Despiking acoustic Doppler velocimeter data’ by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora,” *In Journal of Hydraulic Engineering*, v. 129 (6), pp. 484-487.