

# ESTUDO DA DINÂMICA DOS SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO DO ESTUÁRIO DO RIO ARARANGUÁ (SC): POSSÍVEIS EFEITOS DA DRENAGEM ÁCIDA DA ATIVIDADE DE MINERAÇÃO DE CARVÃO

Mariana Afonso Abade COUCEIRO <sup>1</sup> & Carlos Augusto França SCHETTINI <sup>2</sup>

(1) Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGGeo/UFRGS).

CP 15001. CEP 91509-900. Porto Alegre, RS. Endereço eletrônico: macouceiro@yahoo.com.br

(2) Instituto de Ciências do Mar; Universidade Federal do Ceará – LABOMAR/UFC. Avenida da Abolição, 458 – Centro.

C.P. 360. CEP 60165-081. Fortaleza, CE. Endereços eletrônicos: carlos.schettini@pq.cnpq.br; guto.schettini@gmail.com

Introdução  
Área de Estudo  
Materiais e Métodos  
Tanque Anular  
Ensaio Dinâmico  
Parâmetros dos Flocos  
Resultados  
Discussão  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – O estuário do rio Araranguá é formado pela confluência dos rios Itoupava e Mãe Luzia. O primeiro drena áreas com atividades agropecuárias enquanto o segundo drena também áreas de atividades de mineração e processamento de carvão. Um dos impactos ambientais decorrentes desta última é a formação de drenagem ácida, onde o pH dos cursos de água podem ficar abaixo de 4. O baixo pH da água tem efeito floculante sobre os sedimentos em suspensão, e as águas provenientes do rio Mãe Luzia são desprovidas de sedimentos em suspensão, ao contrário do rio Itoupava. A confluência da água de ambos produz a floculação dos sedimentos em suspensão do rio Itoupava, acelerando a decantação ao longo do estuário. O objetivo do presente estudo é avaliar a capacidade floculante das águas do rio Mãe Luzia quando esta se mistura com as águas do rio Itoupava, e comparativamente com a água do mar. Foi utilizado um tanque anular para simular condições de escoamento contínuo, dentro do qual foram realizadas misturas entre as águas dos rios, avaliando o efeito do pH e da salinidade, separadamente e em conjunto. Durante cada experimento a velocidade do escoamento foi controlada para diminuir e aumentar em intervalos regulares de tempo. A concentração de sedimentos em suspensão foi monitorada continuamente com sensores de turbidez. Para cada passo de velocidade amostras de água do tanque foram extraídas para determinação da dimensão dos flocos e sua velocidade de decantação em uma coluna de decantação. Os principais resultados indicam que a formação de macro-flocos e sua decantação ocorrem principalmente quando a velocidade abaixo de  $15 \text{ cm s}^{-1}$ , e, inversamente, quando a velocidade aumenta acima de  $15 \text{ cm s}^{-1}$  os flocos são ressuspenso e destruídos. A contribuição de água do rio Mãe Luzia, mesmo em pequena proporção, produz o mesmo efeito floculante que a mistura com salinidade de um.

**Palavras-chave:** floculação, sedimentos finos, tanque anular.

**ABSTRACT** – M.A.A. Couceiro & C.A.F. Schettini - *Assessment of the suspended sediment dynamics of the Araranguá river estuary (SC): possible effects of acid drainage from the coal mining activity.* The Araranguá river estuary rises from the inflow of two main tributaries, the rivers Itoupava and Mãe Luzia. The former drains mainly agriculture and cattle raising areas, meanwhile the latter drains also coal mining areas, which produces acid drainage ( $\text{pH} < 4$ ). One of environmental impacts of the latter is the acid drainage, when the streams pH can be decreased below 4. The low water pH enhance the suspended sediment flocculation, and the Mãe Luzia's water are depleted of suspended sediments, meanwhile the contrary is observed for the Itoupavas river. When the waters from both rivers mix, the Itoupavas' suspended sediment flocculates, inducing rapid settling along the estuary. The objective of the present study is to assess flocculation potential from the Mãe Luzia's water during the mixing with the Itoupavas' water, and comparatively with seawater. An annular flume was setup to simulated continuous flow, within were mixed the rivers waters, assessing the pH effects and salinity, separately and together. During every experiment the flow velocity was controlled to decelerated and accelerated at regular time intervals. The concentration of suspended sediments was continuously monitored with turbidity sensors. At every velocity change, water samples from the flume were taken for the assessing of floc settling velocity and shape in a settling chamber. The main findings are that the formation of macro-flocs and its settling take place mainly when the flow velocity is below than  $15 \text{ cm s}^{-1}$ , and, inversely, when the velocity is higher than  $15 \text{ cm s}^{-1}$  the flocs are resuspended and destroyed. The contribution of the Mãe Luzia water, even in small proportion, has the same flocculant effect than the mixing with salinity of one.

**Keywords:** flocculation, fine sediments, annular flume.

## INTRODUÇÃO

Os estuários são as principais vias de transferência de água, sedimento, nutrientes e poluentes dos continentes para os oceanos. Grande parte do material sedimentar estuarino é proveniente da erosão da bacia de drenagem, cujos principais constituintes são silte e argila, que constituem partículas inferiores a 60  $\mu\text{m}$  (Mehta & Partheniades, 1975; Krone, 1978). O transporte dos sedimentos através do estuário até que alcancem a região costeira é controlado pelo aporte fluvial de sedimentos e pelo padrão de circulação estuarino. Essa circulação é gerada pelas variações do nível do mar, pela descarga de água doce, pelo gradiente de densidade, pela circulação da plataforma continental e pela ação do vento na superfície livre (Miranda et al., 2002). Embora a circulação represente um papel primordial na dinâmica sedimentar, as características dinâmicas dos sedimentos podem desempenhar um papel igualmente importante. O processo de floculação dos sedimentos finos (e.g., Eisma, 1986) aumenta potencialmente a sua velocidade de decantação, e por conseqüência a sua retenção no estuário, o que torna estes ambientes filtros de materiais na transição continente-oceano (Schubel & Carter, 1984).

O processo de floculação em estuários está principalmente associado com a presença de água marinha, ocorrendo a partir de salinidade de 0,5 (Postma, 1967; Winterwerp, 2002). Uma vez formados, os flocos permanecem em suspensão se as flutuações das forças da velocidade vertical (difusão turbulenta) forem maiores que a velocidade de decantação. Contudo, os flocos são normalmente frágeis e rompem-se sob condições turbulentas. Desta forma, flocos maiores somente serão formados em menores velocidades de corrente, o que maximiza a sua deposição no fundo (Döbereiner, 1982). Contrariamente, condições turbulentas impedem a formação de flocos grandes, e mantém as partículas em suspensão permitindo que estas sejam carregadas e possivelmente exportadas para a região costeira.

A caracterização dos parâmetros dos flocos, como o tamanho, a velocidade de decantação e a densidade, assim com seu comportamento em suspensão e no fundo, são importantes para a compreensão da dinâmica sedimentar de estuários (Gibbs, 1983; Trento, 2005; Schaaff et al., 2006). Essas informações podem subsidiar o manejo da disposição de materiais dragados e indicar a dispersão de contaminantes relacionados com sedimentos finos. Entretanto, dada a natureza relativamente frágil dos flocos, as técnicas de observação e mensuração de suas propriedades físicas são bastante diversas, e comumente complexas: amostragem utilizando garrafas de coleta pode quebrar os flocos

durante o fechamento; aplicação de câmeras submersas e/ou câmeras de decantação com filmagem dependem de uma plataforma de observação estável e condições ambientais restritas; utilização de tanques em laboratório não reproduz toda a complexidade do ambiente; etc. (Eisma & Kalf, 1996; Widdows et al., 1998; Manning & Dyer, 1999 e 2002; Droppo et al., 2001; McAnally & Metha, 2002; Nobbs et al., 2002; Manning, 2004; Manning et al., 2004 e 2007; Benson & French, 2007; Winter et al., 2007; Mantovanelli, 2008).

O estuário do rio Araranguá é formado pela confluência dos rios Itoupava e Mãe Luzia, cerca de 35 km a montante da desembocadura no Oceano Atlântico. Ambos os rios apresentam áreas de drenagem similares ( $\sim 1000 \text{ km}^2$ ), e em ambas as bacias ocorrem extensas áreas com atividades agro-pecuárias, sendo a rizicultura uma das atividades mais importantes. Por outro lado, na bacia do rio Mãe Luzia também ocorre atividade mineradora de carvão, o que gera drenagem ácida. Em alguns cursos de água foram registrados valores de pH abaixo de 3 (Gothe, 1989), e mesmo próximo da desembocadura foi observado valores de pH em torno de 5 (D'Aquino et al., no prelo). Durante uma campanha de coleta de dados físicos em 2005 (D'Aquino et al., no prelo) durante um período de descarga fluvial elevada foi observada a ocorrência de grandes flocos de coloração avermelhada na região do estuário próximo da confluência dos rios, onde a salinidade registrada foi zero. Na região próxima a desembocadura, aonde a salinidade era da ordem de 10 psu, a água encontrava-se bastante transparente.

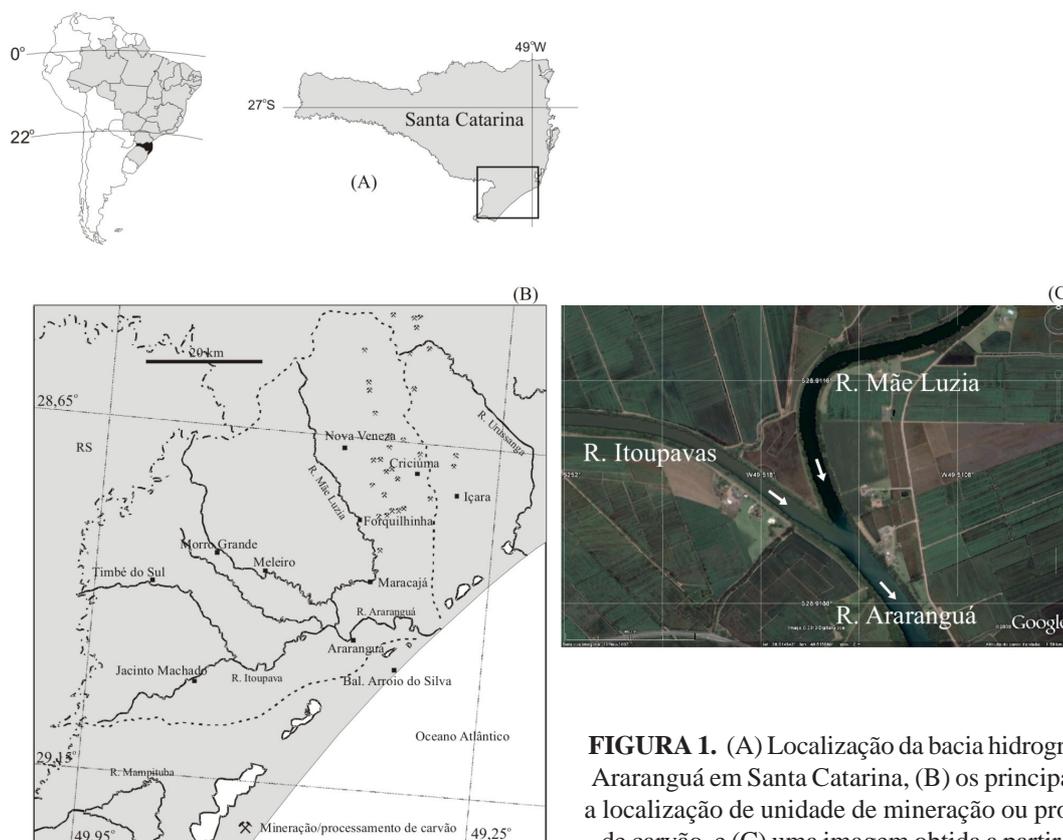
As observações realizadas levantaram a hipótese de que o baixo pH do rio Mãe Luzia seria o responsável pela floculação dos sedimentos em suspensão carregados pelo rio Itoupava, e a coloração avermelhada seria produzida pela floculação do ferro dissolvido com a elevação do pH pelo efeito de diluição (e.g. White *et al.*, 1997; Braungardt et al., 2003). A floculação dos sedimentos em suspensão em estuários ocorre somente quando inicia a mistura entre água doce e marinha (Postma, 1967; Dyer, 1995). Contudo, no caso do estuário do Rio Araranguá a floculação ocorre antes do encontro da água fluvial com a água marinha, potencialmente aumentando a capacidade filtrante do sistema (e.g. Schubel & Carter, 1984). A motivação do presente estudo foi a de testar a hipóteses acima através da verificação do potencial floculante das águas do rio Mãe Luzia através de ensaios em condições controladas. Foi empregando um tanque anular para simular as condições de escoamento contínuo com controle da velocidade, sendo monitorada a concentração dos sedimentos em suspensão.

## ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Araranguá está localizada no litoral sul do estado de Santa Catarina (Figura 1), pertencente à vertente atlântica com uma área de drenagem de 3.020 km<sup>2</sup>. Os dois principais rios formadores da bacia formam a mesobacia do rio Mãe Luzia e Itoupava, com uma área da drenagem de 1.501 e 1.181 km<sup>2</sup>, respectivamente (Santa Catarina, 1997). A área de drenagem do rio Mãe Luzia é caracterizada pela atividade de lavra e beneficiamento do carvão, gerando uma drenagem ácida que impede ou limita a utilização da água devido a sua acidez e a presença de contaminantes (Gothe, 1989). O rejeito oriundo dessa atividade é constituído basicamente por materiais carbonosos e minerais (pirita e argilominerais) e está disposto no solo e nos recursos hídricos (Bidone et al., 2000). Os rejeitos ricos em pirita, quando oxidam em contato com o ar, a água e sob a ação de bactérias *Thiobacillus ferroxidans*, promovem a acidificação da água, caracterizada pela cor vermelho-alaranjada (White et al., 1997; Braungardt et al., 2003; Fungaro & Izidoro, 2006). O sistema de drenagem do rio Itoupava apresenta uma área de grande importância no cultivo de arroz, aproximadamente 2.860 hectares. Na época do preparo das quadras de arroz ocorre

considerável aumento da disponibilidade de sedimentos para os cursos de água. Além de comprometer a qualidade do sistema hídrico, a rizicultura gera conflitos no que concerne a utilização da água, pois necessita de grandes volumes para o cultivo (Santa Catarina, 1997).

D'Aquino et al. (no prelo) apresentam uma primeira caracterização hidrográfica do estuário do rio Araranguá. O padrão de circulação estuarina é do tipo altamente estratificado, e dominado pela descarga fluvial. As correntes de maré, tanto de enchente quanto de vazante, atingem cerca de 0,3 ms<sup>-1</sup>, porém sob influência da descarga fluvial podem elevar-se acima de 0,5 ms<sup>-1</sup>. A intrusão salina é grandemente afetada pela descarga fluvial, e em períodos de baixa descarga pode chegar até a confluência dos rios Itoupava e Mãe Luzia. Os sedimentos de fundo ao longo do estuário são arenosos próximo à desembocadura, e lamosos na porção mais a montante. Não há medições de concentração de material particulado em suspensão (MPS), contudo observações empíricas apontam para valores baixos (< 50 mg l<sup>-1</sup>) dada a transparência da água. Observações também empíricas mostram que a concentração de MPS no rio Itoupava é muito maior do que a do rio Mãe Luzia (Figura 1).



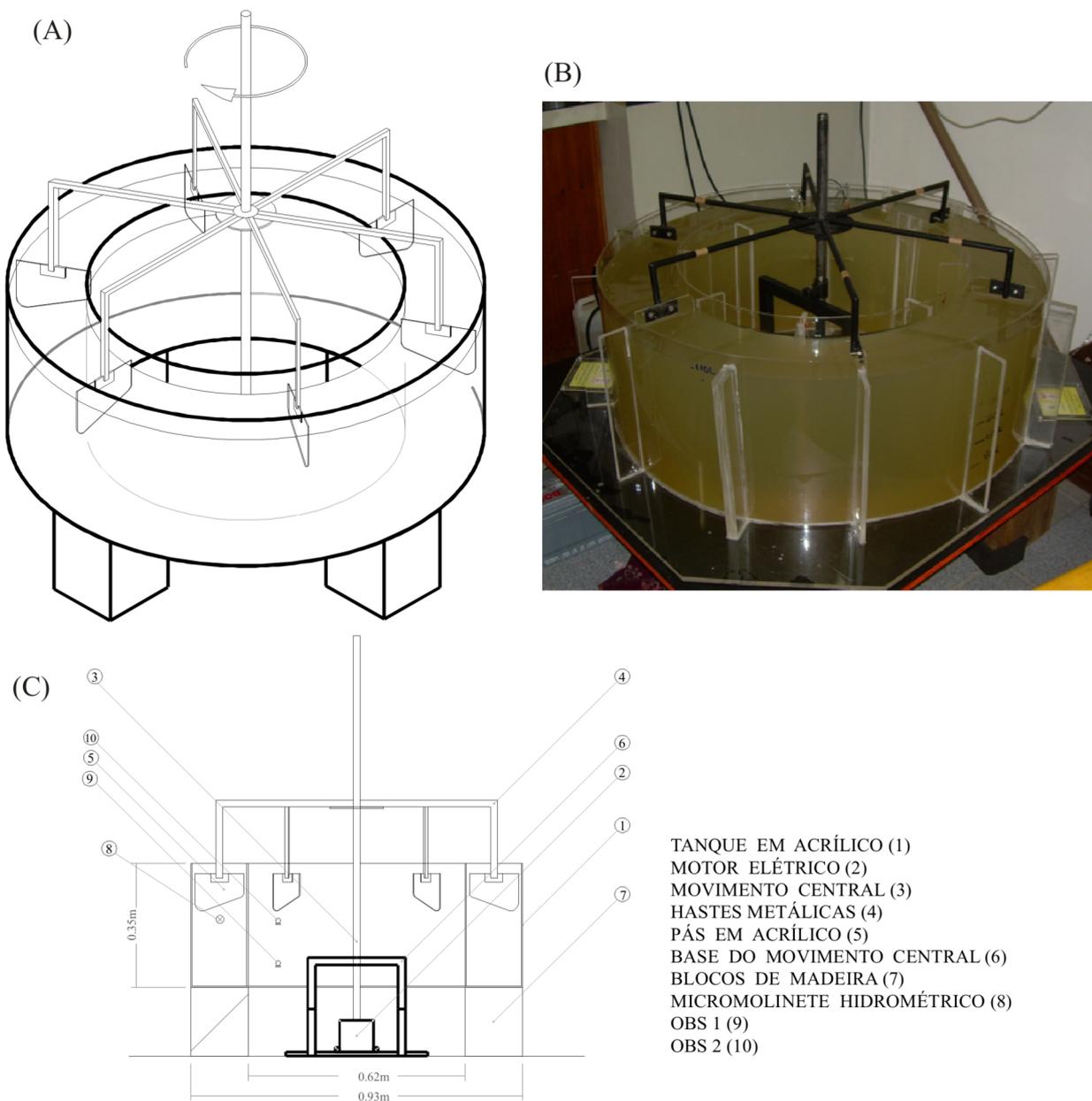
**FIGURA 1.** (A) Localização da bacia hidrográfica do Rio Araranguá em Santa Catarina, (B) os principais rios com a localização de unidade de mineração ou processamento de carvão, e (C) uma imagem obtida a partir do Google Earth da confluência dos rios Itoupavas e Mãe Luzia ilustrando o gradiente de coloração indicativo da concentração de sedimentos em suspensão.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### TANQUE ANULAR

Os experimentos foram realizados em um tanque anular de acrílico com canal de 15 cm de largura, 35 cm de altura, e 1 m de diâmetro externo, com capacidade para 110 l (Figura 2). O tanque foi instalado sobre quatro blocos de madeira maciça para manter a uniformidade do nível da água. O fluxo gerado no tanque foi induzido por seis pás equidistantes fixas em um carrossel. A movimentação das pás foi feita com um motor elétrico de 1 CV com redutor de 1:100, e a velocidade de movimentação das pás foi controlada com um inversor de frequência digital.

A velocidade da corrente no canal foi medida por um micromolinete hidrométrico (marca Ott™) posicionado no centro do canal e fixado na parede do tanque a 18 cm acima da base. A concentração de MPS foi monitorada com dois sensores de turbidez de retroespalhamento óptico da marca D&A™ modelo OBS3+, fixos a 7 e 20 cm acima da base. Os sensores de turbidez registraram valores em voltagem, os quais foram convertidos em concentração de MPS através da calibração dos mesmos. A calibração consistiu na obtenção de leituras dos sensores e a obtenção de amostra de água simultaneamente para determinação



**FIGURA 2.** (A) Perspectiva isométrica do tanque anular e sua instrumentação; (B) fotografia do tanque durante um ensaio; e (C) seção transversal do tanque.

do MPS por gravimetria, em diversos níveis de concentração. As amostras de água foram filtradas em membranas de 0,45 µm de poro e 47 mm de diâmetro, previamente secos e pesados. Após a filtração os filtros foram novamente secos e pesados. A concentração de MPS foi obtida pela razão da diferença entre os pesos pós e pré filtragem pelo volume filtrado.

O molinete e os sensores de turbidez foram conectados em uma placa serial de controle programável (marca Dexter™), a qual converteu os sinais analógicos dos equipamentos em sinais digitais. Esses sinais foram transmitidos para um computador no qual os sinais foram registrados a uma taxa amostral de 10 Hz. A rotação do hélice do molinete hidrométrico gera pulsos de tensão, e a frequência dos pulsos foi determinada pela análise espectral do sinal digital, e convertida em velocidade através de uma curva de calibração aferida pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### ENSAIOS DINÂMICOS

Foram realizadas duas séries de ensaios para avaliar os efeitos do pH e da salinidade no processo de floculação. Uma série para simular a mistura entre as águas dos dois rios (Série A), e uma segunda série igual, porém com mistura adicional de água do mar (Série B). Foi utilizada água coletada nos rios e no mar. A água do rio Itoupava foi coletada na localidade de Taquaruçu (250 l, pH 6,4), e a água do rio Mãe Luzia foi coletada na localidade de Forquilha (50 l, pH 3,0). O pH foi medido com uma sonda portátil da marca Orion™. A água foi coletada nos dias 1 e 2 de agosto de 2008, sendo armazenada em reservatórios de 50 litros até a realização dos ensaios nos dias subsequentes. Uma amostra do sedimento de fundo

do estuário do rio Araranguá foi coletada próxima da confluência dos rios Mãe Luzia e Itoupava. Essa amostra de consistência lamosa foi armazenada resfriada para ser utilizada como fonte de sedimentos para os ensaios.

Considerando que a principal fonte de sedimentos para o estuário é o rio Itoupava, os ensaios foram realizados partindo-se do volume inicial de água deste rio e com o acréscimo da água do rio Mãe Luzia para perfazer 1% e 10% do volume na Série A. O mesmo padrão foi repetido para a Série B, porém com a adição de água marinha com a água do rio Itoupava até a salinidade alcançar 1 psu, representando assim os primeiros estágios da mistura estuarina, a partir do qual a floculação salina já é observada (Postma, 1967; Gibbs, 1983; Eisma, 1986). A salinidade no tanque foi monitorada com uma sonda manual YSI™, e o volume no tanque foi controlado para sempre ser o mesmo em todos os ensaios. A concentração de MPS inicial em todos os ensaios foi em torno de 35 mg l<sup>-1</sup>, obtida a partir do acréscimo de uma solução concentrada feita da mistura da amostra de sedimento de fundo com água do rio Itoupava e monitorada através dos sensores de turbidez. A solução concentrada encontrava-se inicialmente em estado reduzido indicado pela coloração preta, e foi mantida em estado de agitação para aeração por um período de 12 horas para tornar o material oxidado, indicado pela coloração marrom-avermelhada. Esta solução foi mantida em agitação durante todo o experimento. A opção pela concentração de sedimento em suspensão nos ensaios foi empiricamente escolhida por ser aquela a partir da qual tornava o tanque translúcido e ainda garantia um estado de suspensão livre das partículas (e.g. Winterwerp & Van Kesteren, 2002) (Tabela 1).

**TABELA 1.** Sumário das condições para realização dos ensaios em termos de proporção volumétrica entre os Rios Itoupava e Mãe Luzia, e a salinidade, e os resultados de tamanho e velocidade de decantação médios obtidos em cada ensaio.

Experimentos	Volume do Itoupava (%)	Volume do Mãe Luzia (%)	Salinidade	Tamanho de Floco (µm)	Velocidade de Decantação (mms <sup>-1</sup> )
<b>Série A</b>					
Aquecimento A	100%	0%	0	-	-
SA1	100%	0%	0	89,4	2,64
SA2	99%	1%	0	94,8	1,76
SA3	90%	10%	0	166,4	2,09
<b>Série B</b>					
Aquecimento B	100%	0%	0	-	-
SB1	100%	0%	1	103,7	2,67
SB2	99%	1%	1	101,7	2,26
SB3	90%	10%	1	193,6	2,93

Foram realizados 8 ensaios, um a cada dia, consecutivamente, sendo que o primeiro ensaio de cada série foi de aquecimento. Cada ensaio teve duração de 380 minutos onde a velocidade do escoamento variou de um estado inicial de 45  $\text{cm s}^{-1}$ , desacelerando em intervalos de tempo de 20 minutos em 10  $\text{cm s}^{-1}$  até chegar em zero. O tanque permaneceu em repouso por um período de 180 minutos, sendo então acelerado

também em intervalos de tempo de 20 minutos em 5  $\text{cm s}^{-1}$  no primeiro intervalo e em 10  $\text{cm s}^{-1}$  nos posteriores até chegar a 45  $\text{cm s}^{-1}$  (Figura 3). O primeiro ensaio de cada série para aquecimento teve como função aclimatar as condições do sedimento que estava inicialmente formando material de fundo para posterior solução concentrada e posterior condição de baixa concentração no tanque (e.g. Cloutier et al., 2006).

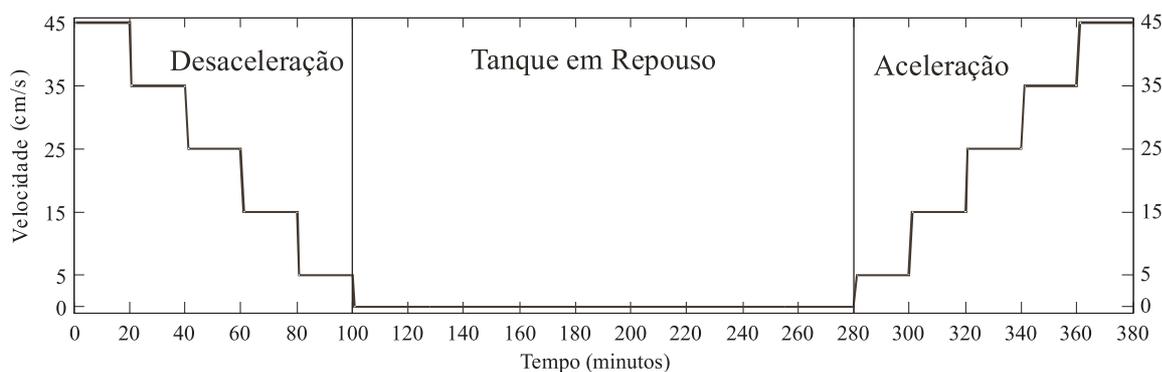


FIGURA 3. Representação da variação da velocidade do fluxo ao longo do tempo durante cada experimento.

## PARÂMETROS DOS FLOCOS

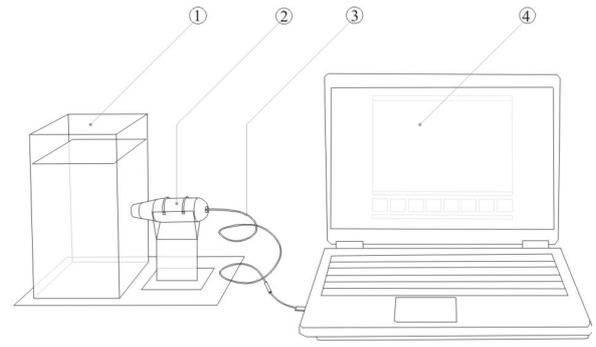
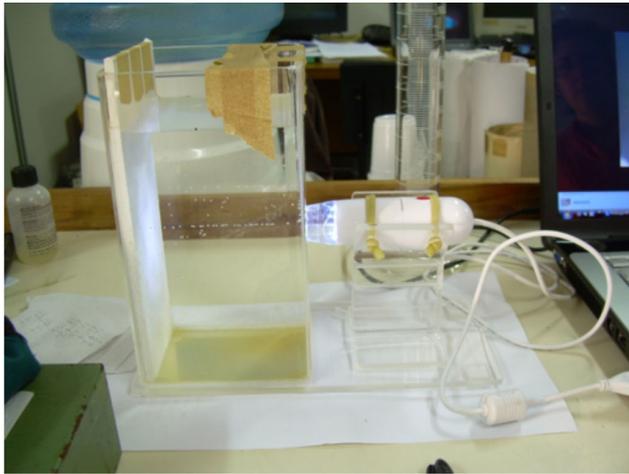
Para a determinação das características dos flocos foi utilizada uma coluna de acrílico com 19 cm de altura e uma base de 10x10 cm (e.g. Manning et al., 2007; Figura 4). As imagens foram obtidas por um microscópio digital de 1,3 mega pixel da marca AVANTSCOPE MAXX™, com resolução da imagem de 640x480 e taxa de ampliação de 10X a 100X. O microscópio foi fixado na parte central de uma das faces da coluna. Nessa posição a área de amostragem da câmera não é afetada pelas correntes criadas no fundo da coluna devido ao decantamento dos flocos (e.g. Nobbs et al., 2002). O suporte do microscópio é fixo na mesma base em que a coluna está fixada, mantendo a estrutura livre de vibrações independentes.

A coluna foi preenchida com água do tanque de acordo com cada ensaio em desenvolvimento. A cada quinze minutos a partir de cada decréscimo ou acréscimo da velocidade, amostras de sedimento em suspensão foram extraídas do tanque com uma pipeta. Essa amostra foi transferida rapidamente do tanque para a coluna de decantação. A liberação do volume da pipeta foi realizada cuidadosamente para que o nível no interior da pipeta fosse o mesmo da coluna no momento da liberação. A câmera registrou continuamente a decantação durante os ensaios, sendo que as adições de amostras na câmara de decantação foram também em intervalos de 20 minutos.

Imagens instantâneas foram extraídas do filme para permitir a análise dos flocos, utilizando o programa FrameShots™, que captura imagens de gravações de vídeo, de acordo com a resolução da gravação, e possibilita ajustar o intervalo de tempo entre uma imagem e outra. A partir de uma seqüência de imagens de um mesmo floco (Figura 5) foi possível calcular a velocidade de decantação através da distância de deslocamento em função do tempo entre imagens. Também a partir das imagens foram extraídas as dimensões dos flocos no eixo vertical no sentido da decantação ( $D_y$ ) e o eixo perpendicular ( $D_x$ ), em cm. O diâmetro equivalente esférico foi determinado por (Manning & Dyer, 2002).

$$D = (D_x D_y)^{0,5} \quad (1)$$

Nas análises foram avaliados e validados apenas os flocos que passaram pela área do foco da câmera e que não pertenciam à circulações secundárias (e.g., movimentos ascendentes). As dimensões reais dos flocos analisados foram baseadas em imagens calibradas, onde as dimensões reais foram ajustas para os flocos. A densidade efetiva ( $\rho_e$ ) de cada floco foi calculada utilizando os valores de tamanho e velocidade de decantação, obtido nas análises das imagens, pela equação reajustada da lei de Stokes:



COLUNA DE DECANTAÇÃO (1)  
CÂMERA (2)  
CABO DE TRANSMISSÃO DE DADOS USB (3)  
HARDWARE / SOFTWARE (4)

**FIGURA 4.** (A) Fotografia e (B) plano esquemático da coluna de decantação e a transmissão dos dados.



**FIGURA 5.** Exemplo de seqüência de imagens de um floco na coluna de decantação.

$$\rho_e = (\rho_f - \rho_w) = \frac{W_s 18\mu}{D_y D_x g} \quad (2)$$

onde  $W_s$  é a velocidade de decantação ( $\text{cm.s}^{-1}$ ),  $\rho_f$  é a densidade do floco úmido ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\rho_w$  é a densidade da água ( $\text{g/cm}^3$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{cm.s}^{-2}$ ) e  $m$  é a viscosidade dinâmica molecular (poises). A densidade efetiva, ou também chamada de densidade de excesso, densidade diferencial e densidade contraste, é a diferença entre a densidade do floco e da água ( $\rho_f - \rho_w$ ) (Fennessy & Dyer, 1996). A densidade da água foi calculada com os valores de temperatura e salinidade pela aplicação da Equação Internacional do Estado da Água do Mar, UNESCO (1983). A Equação

2 foi aplicada somente para os flocos com número de Reynolds ( $R_e$ ) menor que 1 (Fennessy & Dyer, 1996; Van der Lee, 2000; Manning & Dyer, 2002):

$$R_e = \frac{W_s D}{\nu} \quad (3)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de viscosidade cinemática. O número de Reynolds compara, teoricamente, a importância relativa das forças de inércia e viscosa sobre o movimento (Miranda et al., 2002). Quando a força viscosa for mais expressiva, a queda da partícula será mais lenta, já quando a inércia é mais expressiva, a queda é mais rápida (Dyer, 1986).

## RESULTADOS

As variações da concentração do MPS em função do tempo durante a fase de desaceleração de velocidade durante os ensaios são apresentadas na Figura 6, sendo no painel superior para a Série A, e no inferior para a Série B (vide Tabela 1). A velocidade é indicada pelo gradiente de cinza com os valores no eixo superior. Os

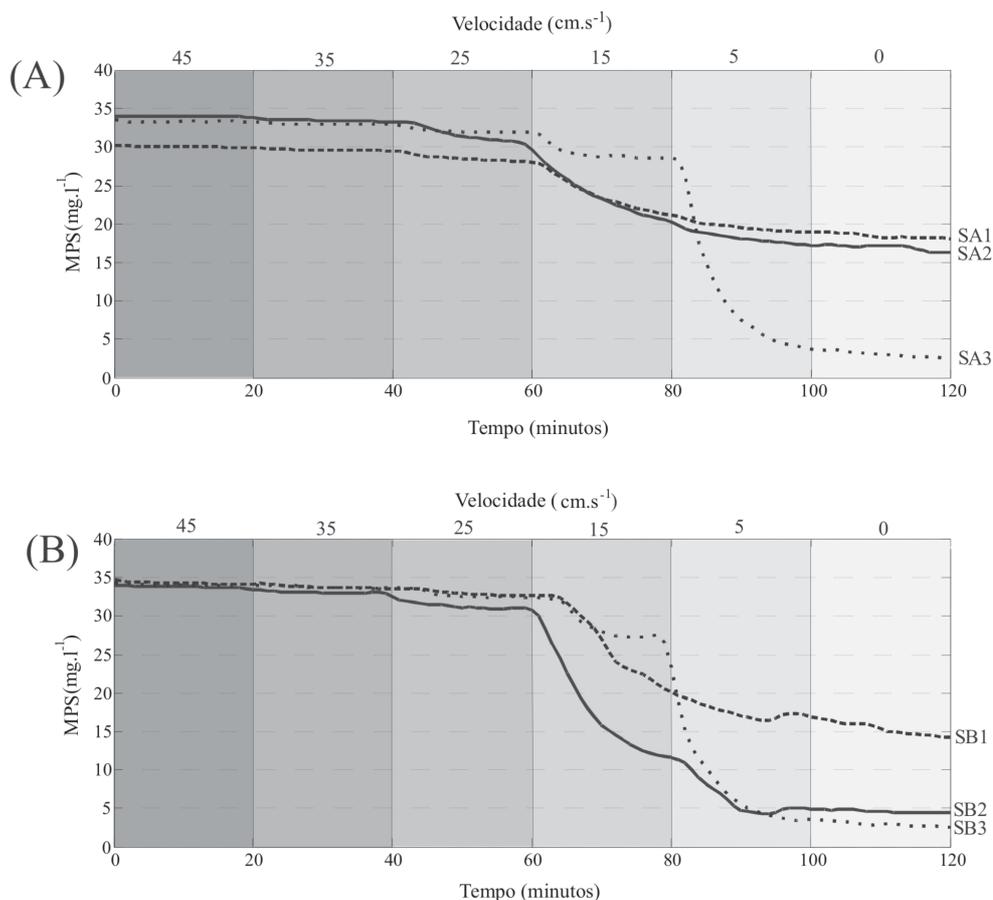
ensaios SA1 e SA2 apresentaram comportamento similar, com a concentração de MPS diminui pouco até a velocidade de  $25 \text{ cm.s}^{-1}$ , diminuindo mais acentuadamente durante a etapa de velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , e estabilizando nas etapas seguintes e tendo ao final do experimento concentração da ordem de  $18 \text{ mg.l}^{-1}$ . A

variação da concentração de MPS durante o experimento SA3 diferiu dos anteriores, apresentando diminuição mais acentuada da concentração na etapa de 5  $\text{cm.s}^{-1}$ , e a concentração de MPS final de menos de 5  $\text{mg.l}^{-1}$ .

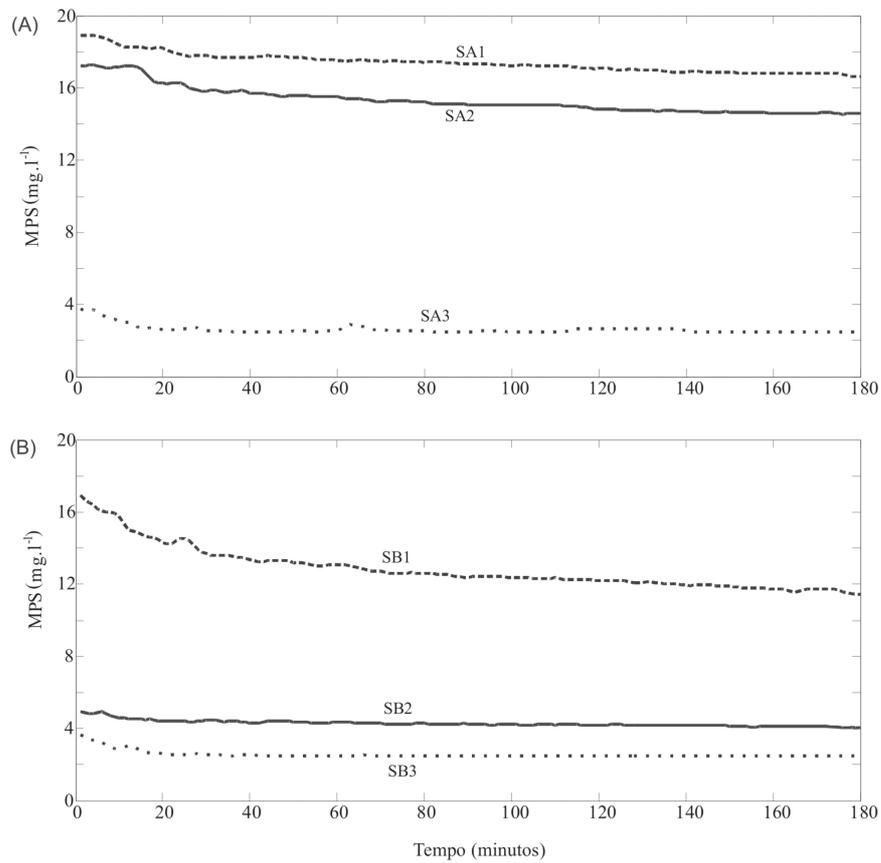
Nos ensaios da Série B, o ensaio SB1 apresentou comportamento similar aos ensaios SA1 e SA2. O ensaio SB2 foi similar no que diz respeito a velocidade, que apresentou maior diminuição da concentração de MPS, porém a diminuição foi mais acentuada chegando a 5  $\text{mg.l}^{-1}$  ao final. O ensaio SB3 apresentou variação de concentração similar ao SA3. Em termos de fração de material decantado, os ensaios da Série A apresentaram 41, 54 e 93% de decantação do MPS, para os ensaios SA1, SA2 e SA3, respectivamente, e os ensaios da Série B apresentaram 58, 88 e 93% de decantação do MPS, para os ensaios SB1, SB2 e SB3, respectivamente. Durante os ensaios SA3 e SB3 foi possível observar visualmente grandes flocos formados e a água do tanque ficou transparente, enquanto que nos demais experimentos houve a formação de flocos, porém pequenos e a água do tanque permaneceu turva ao chegar ao estado de repouso.

A Figura 7 apresenta as variações da concentração do MPS durante o período de 180 min em que o tanque permaneceu em repouso, dos experimentos da série A no painel superior e da série B no painel inferior. Nos ensaios em que taxa de decantação foi menor do que 60% (SA1, SA2 e SB1), a concentração apresentou a tendência de diminuição, menor nos ensaios da Série A, e maior no SB1, principalmente nos primeiros 40 minutos. Nos ensaios que houve elevadas taxas de decantação (SA3, SB2 e SB3) a concentração permaneceu constante durante as três horas de repouso, indicando que não há decantação do material remanescente como MPS.

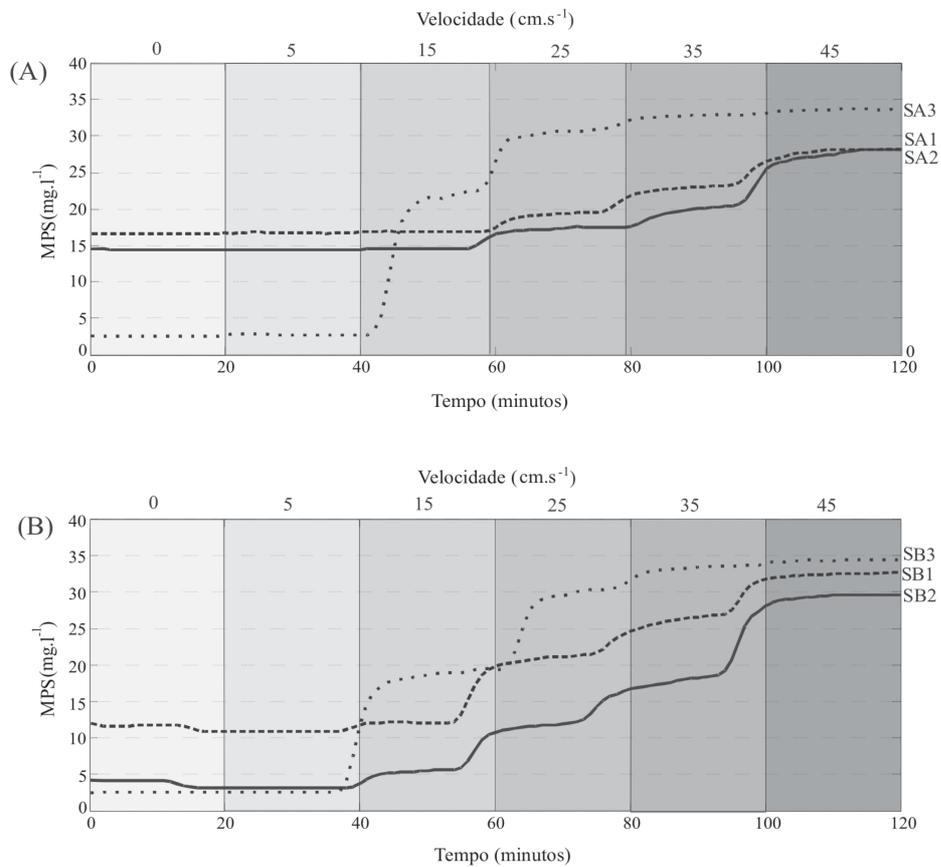
A Figura 8 apresenta as variações da concentração do MPS em função do tempo durante a fase de aceleração de velocidade durante os ensaios, sendo no painel superior para a Série A, e no inferior para a Série B (vide Tabela 1). Para os ensaios SA1 e SA2, a concentração de MPS permaneceu constante até a velocidade atingir os 25  $\text{cm.s}^{-1}$ . A partir dessa velocidade a concentração de MPS aumentou a cada incremento de velocidade até o final dos ensaios. No ensaio SA3 a ressuspensão do material depositado inicia com a



**FIGURA 6.** Séries temporais da concentração de MPS durante os experimentos da Série A (em cima) e Série B (em baixo) para as etapas de deposição.



**FIGURA 7.** Variação da concentração do MPS durante o período de repouso durante os ensaios da Série A (em cima) e Série B (em baixo).



**FIGURA 8.** Séries temporais da concentração de MPS durante os experimentos da Série A (em cima) e Série B (em baixo) para as etapas de erosão.

**TABELA 2.** Resultados das medições de tamanho e velocidade de decantação de flocos a partir da câmara de decantação. VE: velocidade de escoamento; NF: número de flocos; TM: tamanho médio e desvio padrão dos flocos; VD: velocidade de decantação média e desvio padrão.

Ensaio	VE ( $\text{cms}^{-1}$ )	NF	TM ( $\mu\text{m}$ )	VD ( $\text{mms}^{-1}$ )	NF	TM ( $\mu\text{m}$ )	VD ( $\text{mms}^{-1}$ )
<b>Desaceleração</b>			<b>Série A</b>		<b>Série B</b>		
S1	45	6	80,5 ± 24,5	2,3 ± 0,4	21	77,7 ± 18,1	3,8 ± 1,5
	35	4	89,2 ± 32,9	1,6 ± 0,2	8	82,6 ± 34	3,5 ± 1,1
	25	2	89,1 ± 15,5	1,0 ± 0,1	11	55,8 ± 27,4	2,4 ± 0,1
	15	5	175,6 ± 72,9	1,4 ± 0,7	6	112,2 ± 18,1	4,5 ± 1,7
	5	5	66,4 ± 12,3	0,8 ± 0,26	2	86,8 ± 13,6	3,7 ± 1
	0	1	73,7	3,1	-	-	-
S2	45	23	82,0 ± 25,5	0,4 ± 0,1	15	89,3 ± 28,1	2,0 ± 0,2
	35	12	65,5 ± 16,0	0,4 ± 0,1	9	99,3 ± 17,2	1,3 ± 0,4
	25	7	55,3 ± 14,4	1,0 ± 0,1	10	128,1 ± 47,9	2,6 ± 0,8
	15	8	70,0 ± 19,1	0,5 ± 0,2	4	164,0 ± 29,6	3,3 ± 1,8
	5	11	75,5 ± 17,6	1,2 ± 0,5	5	106,1 ± 18,7	4,1 ± 1,4
	0	5	84,8 ± 14	1,6 ± 1,5	-	-	-
S3	45	20	194,8 ± 91	0,8 ± 0,1	20	91,1 ± 38,5	1,8 ± 0,6
	35	14	176,2 ± 63,3	1,2 ± 0,3	9	115,5 ± 35	3,7 ± 1,8
	25	8	192,8 ± 79,2	0,9 ± 0,1	11	92,4 ± 33	4,2 ± 1,4
	15	8	257,0 ± 94	2,0 ± 0,2	14	199,9 ± 87,3	2,6 ± 0,5
	5	5	188,2 ± 75,9	0,7 ± 0,3	-	-	-
	0	2	239,4 ± 47,6	1,0 ± 0,1	-	-	-
<b>Aceleração</b>			<b>Série A</b>		<b>Série B</b>		
S1	45	3	136,6 ± 2,12	2,4 ± 0,9	11	66 ± 10	2,5 ± 0,5
	35	4	120,5 ± 65,2	2,6 ± 0,1	12	85,7 ± 22,8	3,6 ± 1,7
	25	1	79,3	1,84	3	103,8 ± 24	2,4 ± 1,5
	15	-	-	-	1	125,3	3,7
	5	-	-	-	-	-	-
	0	-	-	-	-	-	-
S2	45	6	135,8 ± 60,9	2,8 ± 0,9	20	102 ± 41,3	3 ± 0,6
	35	5	140,5 ± 29,6	5,1 ± 1,5	3	102,8 ± 40,9	1,7 ± 0,6
	25	3	74,1 ± 17,7	1,0 ± 0,2	3	96,1 ± 6,7	2,3 ± 0
	15	1	77	1,6	2	92,9 ± 19,4	1,6 ± 1
	5	3	97,6 ± 29	1,3 ± 0,7	-	-	-
	0	-	-	-	-	-	-
S3	45	9	180,4 ± 56,5	4,0 ± 0,8	9	162,3 ± 55,4	2,4 ± 1,4
	35	12	174,6 ± 77,5	2,9 ± 0,9	17	194,6 ± 73,2	3,4 ± 1
	25	3	228,0 ± 148,5	4,3 ± 3	9	184,2 ± 50	3,5 ± 0,7
	15	4	114,8 ± 62,9	4,0 ± 2,1	6	185 ± 48,4	1,8 ± 0,7
	5	1	330,4	0,2	-	-	-
	0	-	-	-	-	-	-

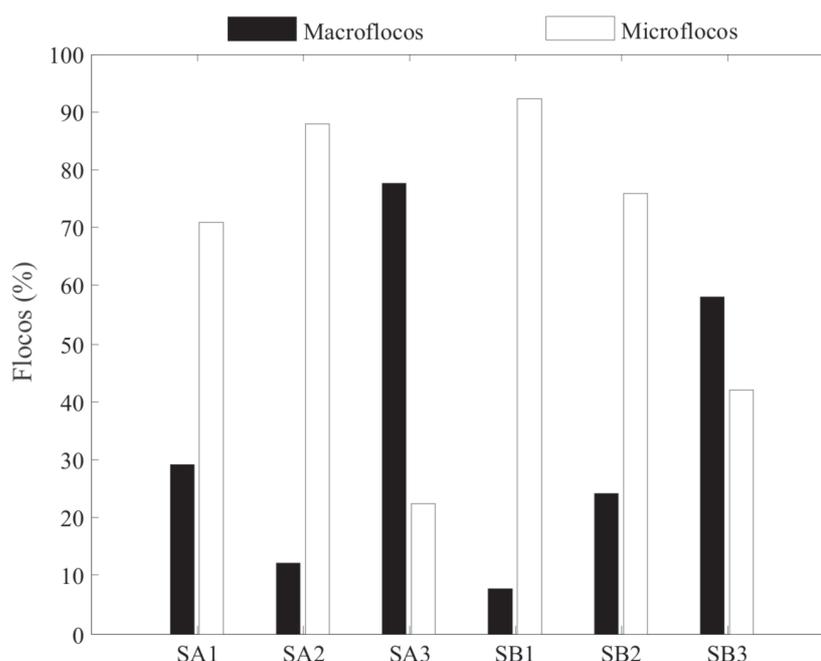
velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , já passando a concentração observada nos ensaios SA1 e SA2 para esta velocidade. No incremento de velocidade para  $25 \text{ cm.s}^{-1}$  houve outro incremento na concentração chegando ao nível próximo do observado no final do ensaio com velocidade de  $45 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Nos ensaios SB1 e SB2 a concentração de MPS começou a aumentar a partir da velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , acompanhando os incrementos de velocidade até o final dos ensaios. No ensaio SB1 o maior incremento de concentração de MPS ocorreu no aumento da velocidade para  $25 \text{ cm.s}^{-1}$ , enquanto que no ensaio SB2 o maior incremento ocorreu no aumento da velocidade para  $45 \text{ cm.s}^{-1}$ . No ensaio SB3 a variação da concentração do MPS foi similar à observada no ensaio SA3: começou a aumentar a partir da velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , e estabilizando já na etapa de velocidade de  $25 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Na Tabela 1 estão os valores médios de tamanho e velocidade de decantação dos flocos para cada ensaio. Não existe uma relação direta entre o tamanho de floco e a velocidade de decantação, mas há uma notável distinção entre os tamanhos de flocos produzidos nos diferentes ensaios de uma mesma série. Os flocos formados no ensaio SA3 foram aproximadamente 1,8x maiores do que os formados nos ensaios SA1 e SA2. Similarmente, os flocos formados no ensaio SB3 foram aproximadamente 1,9x maiores do que os formados nos ensaios SB1 e SB2. Em termos gerais, os flocos formados nos ensaios da Série B foram em torno de 10% maiores do que os formados na Série A.

A Tabela 2 resume os resultados dos valores médios e desvio padrão do tamanho e da velocidade de decantação dos flocos para os ensaios especificando as faixas de velocidade e as fases de desaceleração e aceleração. De maneira geral, não há coerência entre a velocidade do escoamento nem com o tamanho nem com a velocidade de decantação. Também é observada uma considerável dispersão dos valores obtidos, o que reflete a natureza complexa do fenômeno, principalmente em relação ao tamanho. Foram analisados ao todo 442 flocos, sendo 201 nos ensaios durante a fase de desaceleração, e 241 durante a fase de aceleração. O tamanho médio dos flocos foi de  $124,6 \mu\text{m}$ ,  $133,7 \mu\text{m}$  na fase de desaceleração, e  $115,4 \mu\text{m}$  na fase de aceleração. A velocidade de decantação média foi de  $2,4 \text{ mms}^{-1}$ ,  $1,8 \text{ mms}^{-1}$  na fase de desaceleração, e  $2,9 \text{ mms}^{-1}$  na fase de aceleração.

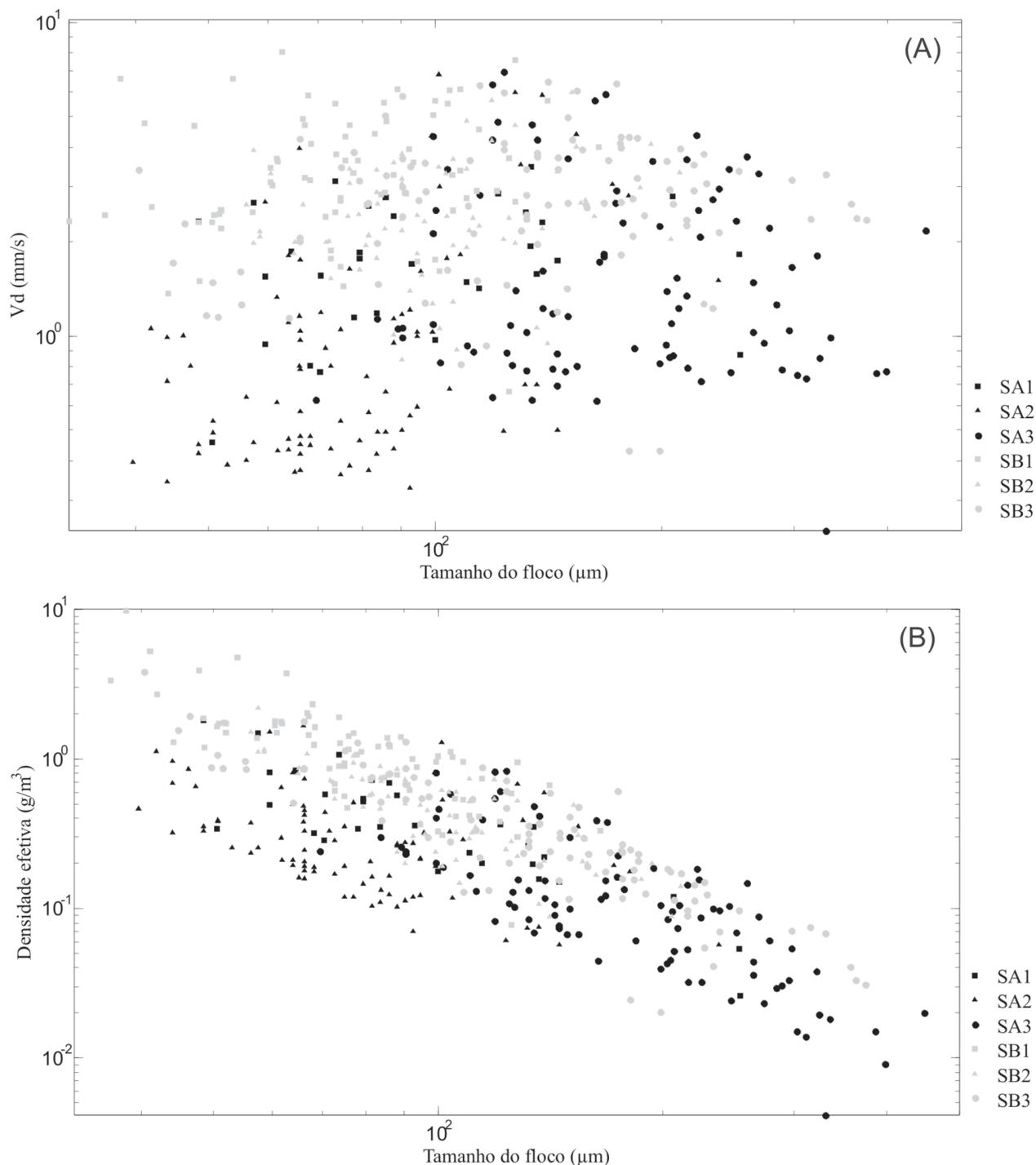
Eisma (1986) distingue flocos entre microflocos e macroflocos tendo como valor de referência o diâmetro de  $125 \mu\text{m}$ . A distribuição dos microflocos e dos macroflocos presente nos experimentos das duas séries de experimentos está representada na Figura 9. Essa relação consiste no cálculo da porcentagem dos flocos de acordo com o total de flocos analisados por experimento. Aproximadamente 64% de todos os flocos analisados nas duas séries experimentais são microflocos. Na série A, os microflocos representaram grande parte dos flocos nos dois primeiros experimentos em ambas as séries. Em SA3 e SB3, os macroflocos foram predominantes sob os microflocos.



**FIGURA 9.** Porcentagem de macroflocos e microflocos de todos os experimentos das séries A e B.

A relação entre a velocidade de decantação em função do tamanho de floco para todas as observações de ambas as séries é apresentada na Figura 10A. É observada grande dispersão dos valores, mas há uma tendência geral de que os flocos formados durante a Série B (símbolos em cinza) apresentam maior velocidade de decantação do que os flocos formados durante a Série A (símbolos em preto). Há uma

tendência, ainda que fraca, de aumento da velocidade de decantação em função do tamanho do floco para os resultados da Série A, e o mesmo não ocorre para a Série B. As relações da densidade efetiva em função do tamanho do floco apresentaram comportamento mais coerente para ambas as séries (Figura 10B). Com o aumento do tamanho do floco, diminui a sua densidade efetiva, como esperado (e.g. Gibbs, 1985).



**FIGURA 10.** Relação entre a velocidade de decantação ( $V_d$ , painel A) e densidade efetiva (painel B) em função do tamanho dos flocos individuais para os ensaios da Série A em preto e da Série B em cinza. Os diferentes símbolos indicam os diferentes ensaios indicados pela legenda.

## DISCUSSÃO

A floculação é um fenômeno reversível, e depende tanto da natureza das partículas que constituem a suspensão quanto das características químicas da solução, concentração das partículas em suspensão, e estado do escoamento (Postma, 1967; Eisma, 1986; Milligan, 1995; Winterwerp & Kesteren, 2004), o que torna difícil a comparação de processos entre sedimentos constituídos por assembléias mineralógicas e condições ambientais distintas. Entretanto, padrões gerais são bem conhecidos, como a relação direta com o aumento da disponibilidade de eletrólitos na solução e matéria orgânica dissolvida, e inversa com a turbulência produzida pela velocidade do escoamento. O presente estudo abordou a floculação dos sedimentos finos no estuário do Rio Araranguá de uma forma objetiva e simplificada, tendo as águas dos próprios rios como soluções experimentais, fornecendo uma concentração constante e variando o grau de mistura de águas e o grau de turbulência do meio. Diversos estudos indicam que a concentração de MPS, por vezes, é até mais importante que a presença de salinidade na indução da floculação (Döbereiner, 1982; Bale et al., 2002; Mikes et al., 2004; Manning, 2004),

Em todos os experimentos foi possível observar, nas etapas finais das fases de desaceleração, a tendência geral de diminuição da concentração de MPS, o que implica no processo de decantação das partículas. A diminuição da velocidade leva a diminuição da turbulência, favorecendo o processo de floculação. Para os experimentos SA1, SA2, SB1 e SB2 o início da decantação ocorreu quando a velocidade de escoamento foi reduzida para menos de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ . Para os experimentos SA3 e SB3, a decantação foi mais intensa quando a velocidade do escoamento diminuiu para  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ . Estes resultados grosseiramente concordam com outras observações, onde a decantação de flocos ocorre em velocidades de fluxo abaixo de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$  (Eisma, 1986).

Comparando a concentração do MPS ao final das etapas de deposição, entre os experimentos das duas séries, a concentração é menor nos experimentos com adição de sal, para os experimentos com 100 % Itoupava e 1% Mãe Luzia, o que sugere que a salinidade contribuiu para uma remoção mais significativa do material em suspensão. Quando comparamos os experimentos SA3 e SB3, não fica evidente nenhuma diferença no comportamento do MPS. A presença de sal em SB3 não foi um fator determinante para que a floculação ocorresse, uma vez que esse processo não foi antecipado em velocidades de fluxo mais elevadas e a concentração ao final das etapas foi praticamente a mesma. Tanto o efeito da salinidade, quanto o do

baixo pH da água do Mãe Luzia, foram determinantes para promover a floculação do material em suspensão. Por outro lado, os resultados dos experimentos com 10% de Mãe Luzia demonstraram que o efeito do baixo pH proporcionou uma maior eficiência do processo de floculação em relação ao efeito da salinidade.

Durante o período de repouso, que se estendeu por três horas, a estabilidade da suspensão foi observada na maioria dos experimentos, excluindo o SB1, o qual apresentou uma redução da concentração durante os quarenta minutos iniciais do período de repouso, e estabilizando a partir daí. A sustentação das partículas em suspensão em repouso indica um estado de suspensão estável. Em repouso, a decantação depende somente das características dos flocos (tamanho, forma e densidade; Pfeiffer, 1996). A sustentação das partículas em suspensão se dá pelas forças repulsivas fracas e, para partículas muito pequenas, também pelos choques inter-partículas produzidos pelo movimento browniano.

Conforme o fluxo do canal iniciou o movimento, o material depositado no fundo passou a ser remobilizado, iniciando o processo de intrusão vertical, ou ressuspensão. A concentração de MPS na coluna de água passou a aumentar gradativamente a partir da etapa da velocidade de  $25 \text{ cm.s}^{-1}$ , exceto para os experimentos SA3 e SB3, onde a velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$  foi suficiente para ressuspender parte do material depositado. No caso, a velocidade de fluxo promovida no tanque foi responsável pela perturbação do sedimento depositado no fundo. A força necessária para erodir o sedimento depositado vai depender das condições de fluxo em que o material foi depositado e da influência da bioestabilização (Droppo et al., 2001), assim como das características do material do fundo como: a mineralogia, o teor de matéria orgânica, a salinidade, o pH, a densidade, etc. No presente caso foi observado que nos experimentos onde o pH é mais baixo os flocos antes depositados, foram ressuspensos em velocidades de fluxo menor em relação aos outros experimentos. Isto indica indiretamente que os flocos formados são maiores, embora menos densos, o que os torna mais susceptíveis ao arrasto produzidos pelo escoamento.

Observando os gráficos de dispersão (Figura 10A e 10B) das duas séries é possível observar que existem flocos com o mesmo tamanho e com uma ampla variação da velocidade de decantação e da densidade efetiva. Essa mesma relação foi observada por Manning et al. (2004 e 2007) e Manning (2004) em estudos de aquisição de imagens *in situ* nos estuários Gironde, Tamar e Medway com um instrumento denominado

INSSEV, que é um equipamento que mede o tamanho, a velocidade de decantação e a densidade efetiva dos flocos. Grande parte dos flocos gerados nos experimentos com adição de sal apresentou velocidades de decantação maiores que os gerados somente em água doce e baixo pH. O aumento da velocidade de decantação parece não estar atrelado ao crescimento dos flocos, pois não existe diferença significativa do tamanho dos flocos entre os experimentos. Resultado semelhante a esse foi encontrado por Döbereiner (1982) no estuário Tay, RU.

O processo de floculação altera o comportamento dinâmico das partículas constituintes alterando assim o transporte do sedimento, e possivelmente dos contaminantes adsorvidos aos flocos (Droppo et al., 1997). Mesmo com menor densidade do que partículas menores, os flocos apresentam maior velocidade de decantação e estão mais propensos a depositarem ao longo do estuário e constituir o fundo. Foi claramente visualizado através dos experimentos no tanque que uma mistura de 10% de água do Mãe Luzia produz

efeito similar a uma condição com salinidade de 1. Ou seja, o processo de floculação induzido pela mistura entre os rios produz um efeito análogo à presença de água marinha.

Um estuário é distinto em setores (e.g. Dionne, 1963), onde o baixo estuário é a região próxima da desembocadura, dominada por processos marinhos e salinidade elevada; o médio estuário onde são observados os gradientes horizontais e verticais mais intensos devido a mistura incompleta entre a água fluvial e marinha, e o alto estuário, onde ainda é observado os efeitos das marés mas não há presença de salinidade. O processo de floculação ocorre a partir do médio estuário, quando passa a haver alguma salinidade. No contexto do balanço sedimentar do estuário do rio Araranguá, o encontro das águas dos rios Mãe Luzia e Itoupavas se dão no alto estuário, e a floculação induzida pelo baixo pH ocorre antes da presença de água marinha. Isto potencialmente aumenta a eficiência da filtração no estuário (Kranck, 1984).

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi simulado o processo de floculação que ocorre no estuário do rio Araranguá através de experimentos utilizando um tanque anular e uma coluna de decantação. Foi confirmando a hipótese de que a mistura das águas entre os rios Mãe Luzia e Itoupavas resulta em floculação do material particulado em suspensão. As águas do rio Mãe Luzia induz o processo de floculação dos sedimentos em suspensão do rio Itoupavas, com eficiência floculante similar a presença de eletrólitos da água do mar com salinidade de um.

O presente estudo não investigou as características físico-químicas das águas do rio Mãe Luzia, porém, seu baixo pH indica que este é fortemente

afetado pela atividade de mineração de carvão que ocorre na sua bacia hidrográfica.

As características dos flocos como o tamanho, velocidade de decantação e densidade efetiva, apresentaram diferenças entre as duas séries de experimentos. Os microflocos foram mais presentes nos experimentos e obtiveram maior variação de densidade efetiva em relação aos macroflocos, que por sua vez, foram mais representativos em SA3. A falta de um padrão nas propriedades dos flocos está correlacionada com a grande variabilidade de fatores que interferem na sua formação, como: a propriedades da água, a salinidade, o pH, a tensão turbulenta e dos processos de floculação e defloculação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Defesa Civil, o Corpo de Bombeiros e Yate Clube de Araranguá pelo apoio logístico; a equipe do Laboratório de Oceanografia Física da UNIVALI, em especial ao Guilherme Manique pela colaboração nas atividades de campo; aos revisores anônimos; ao CNPq, através do projeto: "Processos de Transporte e Retenção de Sedimentos Finos no Estuário do Rio Araranguá" (MCT/CNPq 02/2006 – Universal No. 485373/2006-8). Bolsa de PQ-CNPq 306217/2007-4.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BALE, A.J.; UNCLES, R.J.; WIDDOWS, J.; BRINSLEY, M.D.; BARRET, C.D. Direct observation of the formation and break-up of aggregates in an annular flume using laser reflectance particle sizing. In: WINTERWERP, J.C & KRANENBURG, C. (Coords.), **Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment**. Elsevier Science, p. 189-201, 2002.
2. BENSON, T. & FRENCH, J.R. InSiPID: A new low-cost instrument for *in situ* particle size measurements in estuarine

- and coastal waters. **Journal of Sea Research**, v. 58, p. 167-188, 2007.
3. BIDONE, E.D.; CASTILHOS, Z.C.; GUERRA, T. Interação dos estudos através de uma abordagem (sócio) econômico-ambiental. In: **Carvão e meio ambiente**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, p. 271-439, 2000.
  4. BRAUNGARDT, C.B.; ACHTERBERG, E.P.; ELBAZ-POULICHET, F.; MORLEY, N.M. Metal geochemistry in a mine-polluted estuarine system in Spain. **Applied Geochemistry**, v. 18, p. 1757-1771, 2003.
  5. CLOUTIER, D.; LeCOUTURIER, M.N.; AMOS, C.L.; HILL, P.R. The effects of suspended sediment concentration on turbulence in an annular flume. **Aquatic Ecology**, v. 40, n. 4, p. 555-565, 2006.
  6. D'AQUINO, C.A.; PEREIRA, J.; SCHETTINI, C.A.F. Fluvial modulation of hydrodynamics and salt transport in a highly stratified estuary. **Brazilian Journal of Oceanography**. Artigo aceito para publicação.
  7. DIONNE, J.C. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. **Zeitschr. f. Geomorph.**, v. 7, n. 1, p. 36-44, 1963.
  8. DÖBEREINER, C. **Aggregation and deposition of fine particles in the Tay estuary**. Scotland, UK, 1982. 151 p. Tese (Doutorado em Filosofia) – Faculdade de Ciências, Universidade de Dundee.
  9. DROPPA, I.G.; LAU, Y.L.; MITCHELL, C. The effect of depositional history on contaminated bed sediment stability. **The Science of the Total Environment**, v. 266, p. 7-13, 2001.
  10. DROPPA, I.G.; LEPPARD, G.G.; FLANNIGAN, D.T.; LISS, S.N. The freshwater floc: a functional relationship of water and organic and inorganic floc constituents affecting suspended sediment properties. Netherlands: **Water, Air and Soil Pollution**, v. 99, p. 43-54, 1997.
  11. DYER, K.R. **Coastal and estuarine sediment dynamics**. New York: John Wiley & Sons, 342 p., 1986.
  12. DYER, K.R. Sediment transport processes in estuaries. In: PERILLO, G.M.E. (Ed.), **Geomorphology and sedimentology of estuaries**. New York, Elsevier, p. 423-449, 1995.
  13. EISMA, D. & KALF, J. *In situ* particle (floc) size measurements with the NIOZ *in situ* camera system. **Journal of Sea Research**, v. 36, n. 1/2, p. 49-53, 1996.
  14. EISMA, D. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. **Netherlands Journal of Sea Research**, v. 20, p. 183-199, 1986.
  15. FENNESSY, M.J. & DYER K.R. Floc population characteristics measured with INSSEV during the Elbe estuary intercalibration experiment. **Journal of Sea Research**, v. 36, n. 1/2, p. 55-62, 1996.
  16. FOFONOFF, N.P. & MILLARD, R.C. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater. **Unesco Technical Papers in Marine Sciences**, n. 44, p. 1-53, 1983.
  17. FUNGARO, D.A. & IZIDORO, J.C. Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão. **Química Nova**, v. 29, p. 735-740, 2006.
  18. GIBBS, R.J. Effect of Natural Organic Coatings on the Coagulation of Particles. **Environment Science & Technology**, v. 17, n. 4, p. 237-240, 1983.
  19. GIBBS, R.J. Estuarine flocs: their size, settling velocity and density. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C2, p. 3249-3251, 1985.
  20. GOTHE, C.A.V. Diagnóstico Ambiental da região Carbonífera Catarinense. Florianópolis: **ENESMA**, v. 3, p. 62-96, 1989.
  21. KRANCK, K. The role of flocculation in the filtering of particulate matter in estuaries. In: KENNEDY, V.S. (Coord.), **The estuary as a filter**. New York: Academic Press, p. 159-175, 1984.
  22. KRONE, R.B. Aggregation of suspended particle in estuaries. In: KJERFVE, B. (Coord.), **Estuarine transport processes**. Columbia, USC-Press, p. 177-190, 1978.
  23. MANNING, A.J. Observations of the properties of flocculated cohesive sediment in three western European estuaries. **Journal of Coastal Research**, v. 41, p. 70-81, 2004.
  24. MANNING, A.J. & DYER, K.R. A laboratory examination of floc characteristics with regard to turbulent shearing. **Marine Geology**, v. 160, n. 1/2, p. 147-170, 1999.
  25. MANNING, A.J. & DYER, K.R. The use of optics for the *in situ* determination of flocculated mud characteristics. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 4, p. 71-81, 2002.
  26. MANNING, A.J.; DYER, K.R.; LAFITE, R.; MIKES, D. Flocculation measured by video based instruments in the Gironde estuary during the European commission SWAMIEE project. **Journal of Coastal Research**, v. 41, p. 58-69, 2004.
  27. MANNING, A.J.; FRIEND, P.L.; PROWSE, N.; AMOS, C.L. Estuarine mud flocculation properties determined using an annular mini-flume and the LabSFLOC system. **Continental Shelf Research**, v. 27, n. 8, p. 1080-1095, 2007.
  28. MANTOVANELLI, A.; RIDD, P.V. SEDVEL: An underwater balance for measuring *in situ* settling velocities and suspended cohesive sediment concentrations. **Journal of Sea Research**, v. 60, p. 235-245, 2008.
  29. McANALLY, W.H. & MEHTA, A.J. Significance of aggregation of fine sediment particles in their deposition. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 54, p. 643-653, 2002.
  30. MEHTA, A.J. & PARTHENIADES, E. An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 13, n. 4, p. 361-381, 1975.
  31. MIKES, D.; VERNEY, R.; LAFITE, R.; BELORGEY, M. Controlling factors in estuarine flocculation processes: experimental results with material from the Seine estuary, northwestern France. **Journal of Coastal Research**, v. 41, p. 82-89, 2004.
  32. MILLIGAN, T.G. An examination of the settling behaviour of a flocculated suspension. **Netherlands Journal of Sea Research**, v. 33, n. 2, p. 163-171, 1995.
  33. MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M. DE; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: EDUSP, 414 p., 2002.
  34. NOBBS, D.; TANG, P.; RAPER, J.A. The design, construction and commissioning of a low-cost optical particle size analyzer specifically for measurement of settling velocities and size of flocs. **Measurement Science and Technology**, v. 13, p. 297-302, 2002.
  35. PFEIFFER, A. *In situ* measurements of flocculated suspended matter with a video multi sensor system. **Journal of Sea Research**, v. 36, n. 1/2, p. 115-118, 1996.
  36. POSTMA, H. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. In: LAUFF, G.H. (Ed.), **Estuaries**. Washington: AAAS Publisher 83, p. 158-179, 1967.
  37. SANTA CATARINA – SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO RURAL E DA AGRICULTURA. **Zoneamento da disponibilidade e da qualidade hídrica da bacia do rio Araranguá**. Documento síntese. Florianópolis, v. 1, 1997.
  38. SCHAAFF, E.; GRENZ, C.; PINAZO, C.; LANSARD, B. Field and laboratory measurements of sediment erodibility: A comparison. **Journal of Sea Research**, v. 55, p. 30-42, 2006.
  39. SCHUBEL, J.R. & CARTER, H.H. The estuary as a filter for fine-grained suspended sediment. In: KENNEDY, V. S. (Coord.), **The estuary as a filter**. New York, Academic Press, p. 81-105, 1984.
  40. TRENTO A.E. **Dinâmica da flocação no transporte de sedimentos finos**. Rio de Janeiro, 2005. 185 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

41. VAN DER LEE, W.T.B. Temporal variation on floc size and settling velocity in the Dollard estuary. **Continental Shelf Research**, v. 20, p. 1495-1511, 2000.
42. WHITE, I.; MELVILLE, M.D.; WILSON, B.P.; SAMMUT, J. Reducing acidic discharges from wetlands in eastern Australia. **Wetlands Ecology and Managements**, v. 5, p. 55-72, 1997.
43. WIDDOWS, J.; BRINSLEY, M.D.; BOWLEY, N.; BARRETT, C. A benthic annular flume for *in situ* measurement of suspension feeding/biodeposition rates and erosion potential of intertidal cohesive sediments. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 46, p. 27-38, 1998.
44. WINTER, C.; BECKER, M.; ERNSTSEN, V.B.; HEBBELN, D.; PORT, A.; BARTHOLOMÄ, A.; FLEMMING, B.; LUNAU, M. 2007. *In situ* observation of aggregate dynamics in a tidal channel using acoustics, laser diffraction, and optics. In: INTERNATIONAL COASTAL SYMPOSIUM, 9, 2007, Gold Coast, Australia. **Proceedings...** Journal of Coastal Research, Special Issue, p. 50.
45. WINTERWERP, J.C. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. **Continental Shelf Research**, v. 22, p. 1339-1360, 2002.
46. WINTERWERP, J.C.; KESTEREN W.G.M. Van. **Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marina Environment**. Amsterdam: Elsevier, 466 p., 2004.

*Manuscrito Recebido em: 20 de julho de 2009*  
*Revisado e Aceito em: 27 de maio de 2010*