

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ESTUDO DO EFEITO DA DRENAGEM ÁCIDA DA  
ATIVIDADE DE MINERAÇÃO DE CARVÃO SOBRE AS  
CARACTERÍSTICAS DO SEDIMENTO EM SUSPENSÃO  
DO ESTUÁRIO DO RIO ARARANGUÁ, SC.**

**MARIANA AFONSO ABADE COUCEIRO**

ORIENTADOR – Prof. Dr. Carlos Augusto França Schettini

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Júnior – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Valéria da Silva Quaresma – Centro de Ciências Humanas e Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo

Profa. Dra. Lidriana de Souza Pinheiro – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará

Dissertação de Mestrado apresentada  
como requisito parcial para a obtenção  
do Título de Mestre em Geociências.

Porto Alegre – 2009

Couceiro, Mariana Afonso Abade

Estudo do efeito da drenagem ácida da atividade de mineração de carvão sobre as características do sedimento em suspensão do estuário do rio Araranguá, SC. / Mariana Afonso Abade Couceiro. - Porto Alegre : IGEO/UFRGS, 2009.

[56 f.] il.

Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2009.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Augusto França Schettini.

1. Floculação. 2. Drenagem ácida. 3. Mineração de carvão. 4. Tanque anular. I. Título.

---

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Geociências - UFRGS  
Miriam Alves CRB 10/1947

*Ao meu amado marido Fernando  
Aos meus pais Ana Maria e Nilton  
E ao meu querido irmão Gabriel*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. Carlos Augusto França Schettini, pela oportunidade de realização do trabalho, pela confiança e pelos ensinamentos, ao qual sou muito grata à sua atenção durante todos esses anos.

Ao professor Guto e ao colega Guilherme Manique pela ajuda na coleta de água dos rios, sem a qual minha força física impossibilitaria tal objetivo. Aos bombeiros: Sargento Niles, Sargento Cruz e Soldado Giovane, à Defesa Civil e ao pessoal do Iate Clube de Araranguá, pelo apoio logístico para a realização das atividades no campo.

Ao CNPq pelo apoio econômico na realização do mestrado e pelo financiamento da construção de equipamentos utilizados em laboratório e no suporte das atividades de campo.

Ao pesquisador da EPAGRI Francisco Deschamps pelo empréstimo do micromolinetete hidrométrico, e pela atenção com o correto funcionamento do equipamento.

Ao pessoal do Laboratório de Toxicologia da UNIVALI pelo apoio com materiais.

À professora Nane pela paciência e compreensão.

Um agradecimento especial ao Lourival por sua total dedicação em apoiar o trabalho com seus conhecimentos em programação, e por sua amizade. Da mesma forma agradeço ao Cris.

À Carla e ao Guilherme pela ajuda com os filtros. Aos estagiários do Laboratório de Oceanografia Física da UNIVALI: Morjana, Elizandra, João, Daniel, Guilherme, Tomaz e Antônio, pela compreensão na utilização do espaço físico do laboratório e pelas horas de descontração nos lanches às quintas-feiras.

Aos meus amigos Adelaine, Fausto, Thaís, Karen, Leopoldo e Dona Guelminda pela hospedagem e apoio nos períodos de estadia em Itajaí.

Ao meu marido Fernando pelo apoio incondicional em todos os momentos de minha vida.

À minha mãe, que sempre acreditou em mim e me ajudou com seus conhecimentos em todas as minhas decisões.

Ao Ataul, que me deu suporte para minhas escolhas.

Ao meu pai, que me ajudou nessa etapa com muita atenção.

E ao meu irmão Gabriel por suas sábias palavras.

## RESUMO

O objetivo desse estudo é determinar qual o efeito do pH e da salinidade, separadamente e em conjunto, na floculação do material particulado em suspensão (MPS), no estuário do rio Araranguá. O qual é formado pela confluência dos rios Itoupava e Mãe Luzia. O rio Itoupava drena uma área onde o arroz é cultivado densamente, contribuindo para o aumento do MPS. O rio Mãe Luzia drena áreas de lavra e beneficiamento do carvão, atividades essas que promovem a acidificação da água do rio. O baixo pH da água promove a floculação do MPS ao longo do rio, e ao contrário da cultura do arroz, diminuiu a presença de MPS no estuário. A região ainda está sob o efeito das marés (micromaré) e da salinidade, quando a descarga do rio é baixa, o que é freqüente. Deste modo, supõe-se que a atividade mineração de carvão aumenta a retenção de MPS no estuário, e conseqüentemente outros contaminantes que podem estar adsorvidos. Um tanque anular foi projetado para criar condições de fluxo contínuo para simular a mistura de água dos rios, com e sem salinidade. O tanque foi construído com acrílico transparente, com 15,5 cm de largura do canal e 35 cm de altura, com capacidade para 115 litros. Seis pás promovem o fluxo no canal, as quais são aceleradas ou desaceleradas digitalmente. A velocidade do fluxo foi medida com um micromolinetete hidrométrico, com medições contínuas, posicionado a 18 cm da base. A concentração de MPS foi medida durante os experimentos com dois sensores ópticos de retroespalhamento posicionados na parede do tanque. Os experimentos foram realizados usando águas coletadas nos rios Itoupava e Mãe Luzia. Duas séries experimentais foram realizadas, na primeira foram misturadas apenas as águas dos rios e na segunda água salina foi adicionada à mistura, variando proporcionalmente as águas de cada rio, em cada série. A concentração de MPS inicial de cada série foi de  $35 \text{ mg.l}^{-1}$ . A velocidade inicial de cada experimento foi de  $45 \text{ cm.s}^{-1}$ , reduzida em cinco etapas a cada 20 minutos, até zero (etapa de desaceleração), então o tanque permaneceu com velocidade nula por 180 minutos até o início da etapa de aceleração, onde a cada 20 minutos a velocidade aumentou até  $45 \text{ cm.s}^{-1}$ . Amostras de água foram coletadas para determinar as características flocos em uma coluna de decantação, com uma câmera digital acoplada. A deposição do material em suspensão ocorreu em velocidades de fluxo mais baixas. Os microflocos representaram grande parte dos flocos formados nos experimentos. Nos experimentos com 10% de Mãe Luzia, os macroflocos foram predominantes. A adição de sal teve um papel importante na floculação, mais a

seqüência de experimentos mostra que esse processo é mais intenso com uma maior proporção de água do Mãe Luzia.

## ABSTRACT

The objective of this study is to assess what is the effects of pH and salinity, separately and together, in the flocculation of suspended particulate matter (SPM) in the Araranguá estuary. What is formed by the confluence of the rivers Itoupava and Mãe Luzia. In the Itoupava River drainage basin there is a significant area of rice crops, what contributing to the increase of suspended particulate matter (SPM) inflow to the estuary. In the Mãe Luzia River drainage basin there is an active industry of coal mining and processing. The effect of low pH is the flocculation of the SPM along the streams, and contrary to rice culture, decreases the SPM inflow to the estuary. Other factors that also play a role is that the rivers confluence is already in the estuary, where there are tides (microtide), and salinity when the rivers discharge is low (what is frequent). Thus, our hypothesis is that the coal mining activity increases the SPM trapping in the estuary, and consequently other contaminants that may be adsorbed to it. An annular flume was setup to create a continuously flowing condition to simulate the river waters mixing, with and without salinity. The annular flume was built with transparent acrylic, with 15 cm wide and 30 cm deep, nearly 1 m diameter and 115 liters. Six paddles maintain the flow, which was accelerated or de-accelerated digitally. The flow velocity was measured with a propeller flowmeter recording continuously, leveled at 18 above the bottom. SPM concentrations were recorded during the experiments with two optical backscatter probes, leveled on the wall of flume. The experiments were carried out using waters collected from the Mãe Luzia and Itoupava. Two sets of experiments were done, being the first with fresh water only, and the second with salinity one, with varying proportions of each river water. The concentration of SPM of each sets were initiated with  $\sim 35 \text{ mg.l}^{-1}$ . The experiments were initiated with velocity at  $45 \text{ cm.s}^{-1}$  and then were reduced five times at 20 minutes intervals to zero (de-accelerating phase), then the tank rest for 180 minutes and initiated de accelerating phase, with steep increases of the velocity every 20 minutes. Water samples were collected to determine the floc feature in a settling chamber wired with a digital camera. The matter in suspended deposition occurred at lower flow velocities. The microflocs represented the most flocs formed in the experiments. The macroflocs were predominant in experiments with 10% of Mãe Luzia. The salt addition has an important role in flocculation. But the sequence of experiments shows that the flocculation is more intense with a greater proportion of water from Mãe Luzia.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de Localização do estuário do rio Araranguá. ....	8
<b>Figura 2.</b> Perspectiva isométrica do tanque anular e sua instrumentação. ....	10
<b>Figura 3.</b> Representação da variação da velocidade do fluxo ao longo do tempo.....	13
<b>Figura 4.</b> Esquema da coluna de decantação e a transmissão dos dados.....	15
<b>Figura 5.</b> Sequência de imagens de um floco na coluna de decantação. ....	16
<b>Figura 6.</b> Séries temporais da concentração de MPS durante os experimentos da série A (gráfico superior) e série B (gráfico inferior) para as etapas de deposição. As linhas rosa, laranja e preta representam, respectivamente, os experimentos com 100% Itoupava, 1% Mãe Luzia e 10% Mãe Luzia.....	18
<b>Figura 7.</b> Variação média do MPS pela velocidade média de fluxo do tanque nas etapas de deposição para a série A. ....	20
<b>Figura 8.</b> Variação média do MPS pela velocidade média de fluxo do tanque nas etapas de deposição para a série B. ....	21
<b>Figura 9.</b> Variação da concentração do MPS para os experimentos da série A. ....	22
<b>Figura 10.</b> Variação da concentração do MPS para os experimentos da série B. ....	22
<b>Figura 11.</b> Séries temporais da concentração de MPS durante os experimentos da série A (gráfico superior) e série B (gráfico inferior) para as etapas de erosão. As linhas rosa, laranja e preta representam, respectivamente, os experimentos com 100% Itoupava, 1% Mãe Luzia e 10% Mãe Luzia.....	24
<b>Figura 12.</b> Variação média do MPS pela velocidade média de fluxo do tanque nas etapas de erosão para a série A. ....	25
<b>Figura 13.</b> Variação média do MPS pela velocidade média de fluxo do tanque nas etapas de erosão para a série B. ....	27
<b>Figura 14.</b> Mostra a porcentagem de macroflocos e microflocos de todos os experimentos das séries A e B.....	31
<b>Figura 15.</b> Relação entre o tamanho e a velocidade de decantação ( $V_d$ ) de flocos individuais dos experimentos da série A e B.....	35
<b>Figura 16.</b> Relação entre o tamanho e a densidade efetiva de flocos individuais dos experimentos da série A e B. ....	36



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Resumo das séries experimentais. ....	11
<b>Tabela 2.</b> Velocidades de fluxo e suas etapas correspondentes.....	13
<b>Tabela 3.</b> Média da concentração de material particulado em suspensão (MPS) e da velocidade do fluxo para cada etapa da deposição dos experimentos da série A.....	19
<b>Tabela 4.</b> Média da concentração de material particulado em suspensão (MPS) e da velocidade do fluxo para cada etapa da deposição dos experimentos da série B.....	21
<b>Tabela 5.</b> Média da concentração de material particulado em suspensão (MPS) e da velocidade do fluxo para cada etapa da erosão dos experimentos da série A. ....	25
<b>Tabela 6.</b> Média da concentração de material particulado em suspensão (MPS) e da velocidade do fluxo para cada etapa da erosão dos experimentos da série B. ....	26
<b>Tabela 7.</b> Número de flocos, tamanho médio e velocidade média de decantação de cada etapa dos experimentos da série A para a etapa de deposição (desaceleração).....	28
<b>Tabela 8.</b> Número de flocos, tamanho médio e velocidade média de decantação de cada etapa dos experimentos da série B para a etapa de deposição (desaceleração).....	29
<b>Tabela 9.</b> Número de flocos, tamanho médio e velocidade média de decantação de cada etapa dos experimentos da série A para a etapa de erosão (aceleração).....	30
<b>Tabela 10.</b> Número de flocos, tamanho médio e velocidade média de decantação de cada etapa dos experimentos da série B para a etapa de erosão (aceleração). ....	30

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	v
ABSTRACT .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	x
APRESENTAÇÃO.....	xii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 O ESTUÁRIO DO RIO ARARANGUÁ.....	5
1.2 OBJETIVO.....	7
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
2.1. TANQUE ANULAR.....	9
2.2. COLETA DO MATERIAL.....	10
2.3. MÉTODO EXPERIMENTAL .....	11
2.4. COLUNA DE DECANTAÇÃO.....	14
3. RESULTADOS .....	17
3.1. EXPERIMENTOS DE DEPOSIÇÃO.....	17
3.2. EXPERIMENTOS DE EROSIÃO.....	23
3.3. CARACTERÍSTICAS DOS FLOCOS .....	27
4. DISCUSSÃO .....	32
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	37
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39
ANEXO 1.....	44

## APRESENTAÇÃO

A presente dissertação foi desenvolvida como parte da execução do projeto “Processos de Transporte e Retenção de Sedimentos Finos no Estuário do Rio Araranguá, SC.” realizado com recursos do CNPq através do Edital Universal de 2006 (Processo N.o 485373/2006-8). O objetivo geral do projeto visa compreender melhor os processos que controlam o balanço de sedimentos finos no estuário, tendo como peculiaridade o efeito da drenagem ácida causada pela atividade de mineração na sub-bacia do Rio Mãe Luzia. Durante o projeto foram realizados levantamentos de dados hidrográficos na região estuarina para caracterizar a hidrodinâmica do sistema. E, complementarmente aos estudos hidrodinâmicos ‘in situ’, o presente trabalho visou estudar o comportamento dos sedimentos em suspensão sob diferentes condições de correntes e mistura de águas, porém em laboratório. Foi construído especialmente um tanque anular para simular condições de fluxo contínuo e misturas controladas de águas e sedimentos. O artigo resultante do presente trabalho foi submetido para publicação na Revista Geociências, da UNESP.

## 1. INTRODUÇÃO

Os estuários transferem água, sedimentos, nutrientes e poluentes coletados pelos rios para a zona costeira. Grande parte do material sedimentar estuarino é proveniente da erosão da bacia de drenagem (Krone, 1978), cujos principais constituintes são silte e argila, compreendendo partículas inferiores a 60  $\mu\text{m}$  (Mehta & Partheniades, 1975). O transporte e a trajetória dos sedimentos, até que alcance o canal de navegação ou a enseada, são controlados pelo padrão de circulação do estuário.

A circulação nos estuários é gerada pelas variações do nível do mar, pela descarga de água doce, pelo gradiente de pressão (circulação gravitacional), pela circulação da plataforma continental e pela ação do vento na superfície livre (Miranda et al., 2002). Em estuários classificados como altamente estratificados, a circulação é dominada pelo fluxo do rio, já nos estuários classificados como parcialmente ou bem misturados, a circulação é controlada pela ação da maré.

A transferência de materiais entre os rios e o oceano está diretamente relacionada com a competência do fluxo do rio em expulsar os sedimentos finos. O processo de floculação, que refere-se à formação de flocos por aglutinação, envolve a retenção dos sedimentos finos no estuário, que por sua vez está vinculado com a eficiência de filtração no ambiente de transição. Uma variedade de processos físicos, oceanográficos, geoquímicos e biológicos, pode determinar a eficiência de filtração de um estuário (Schubel & Carter, 1984). Em estuários estratificados, a retenção de partículas em suspensão é maior devido à variação vertical do sedimento em suspensão e da velocidade, em uma variedade de frequências. Sedimentos retidos na região próxima do fundo podem ser transportados rio acima pela circulação gravitacional (Jay & Musiak, 1994). Considerando o transporte de sedimento junto ao fundo para a plataforma adjacente, a morfologia do estuário atua no direcionamento do transporte (Ayup, 1987).

Sedimentos coesivos, ou finos, encontrados no ambiente marinho, consistem de uma mistura de argila, silte, areia fina, matéria orgânica, água e alguns gases. Seu comportamento coesivo é determinado pela relação entre as partículas de argila, os argilo-minerais, e a matéria orgânica com as propriedades químicas do fluido (Winterwerp & Kesteren, 2004).

A estrutura do grupo dos argilo-minerais compreende de lâminas de  $\text{SiO}_4$  tetraédrica unidas de diferentes maneiras, geralmente envolvendo uma camada de alumínio ou hidróxido de alumínio e substituições de um elemento pelo outro, proporcionando uma grande variedade de estruturas (Dyer, 1986). Suas superfícies são carregadas eletricamente, devido a substituições isomorfas de magnésio ou outro íon bivalente alumínio trivalentes, ou o alumínio por silício polivalente em camadas reticuladas de silicato de alumínio (Krone, 1978). A carga elétrica na face das argilas é geralmente negativa, devido à exposição de átomos de oxigênio liberados na quebra das ligações do cristal, já nas extremidades, a carga é positiva, devido à quebra das ligações de sílica tetraédrica, resultando, normalmente negativamente (Winterwerp & Kesteren, 2004).

Os principais argilo-minerais encontrados no ambiente marinho são: caolinitas, illitas, montmorilonitas, esmectitas e cloritas (Postma, 1967; Dyer, 1986; Winterwerp & Kesteren, 2004). Uma característica significativa dessas partículas é sua grande área de superfície específica (área por unidade de volume de partícula), na qual as forças físico-químicas da superfície se tornam mais importantes que seu peso (Döbereiner, 1982). Por serem carregados eletricamente, seu comportamento em suspensão pode ser influenciado pelas condições do fluido. Em águas naturais sua carga é normalmente negativa, em condições de baixa salinidade as forças repulsivas dominam as partículas carregadas negativamente, e algumas interações físico-químicas como a força de London-van der Waals as atraem. Em águas levemente salinas, as forças atrativas promovem a colisão entre as partículas unindo umas às outras formando os flocos (Gibbs, 1983). As forças de atração eletrostáticas são basicamente dependentes das propriedades físicas e mineralógicas das argilas (Postma, 1967).

A flocculação de partículas, processo de interposição de partículas em grandes unidades chamadas de flocos (Eisma, 1986), depende de dois fatores: da taxa de colisões e na probabilidade adesão das partículas após colisão (Kranck, 1973; Burban et al., 1989). O encontro de duas partículas depende do número de partículas em suspensão (concentração) e do deslocamento randômico dessas partículas (turbulência). A adesão das partículas está relacionada com a quantidade de íons livre na suspensão (salinidade) e com as propriedades adesivas da superfície das partículas (biológica) (Krone, 1978). A frequência de colisões é limitada pela combinação de baixas velocidades, baixa tensão de cisalhamento e baixa concentração de partículas (Manning

et al., 2007). O processo de floculação é considerado um fenômeno reversível (Winterwerp & van Kesteren, 2004).

A defloculação, processo pelo o qual o floco é destruído, vai depender da tensão do fluido, da taxa de colisão entre as partículas e da probabilidade de defloculação após a colisão (Burban et al., 1989). Os processos de floculação e defloculação dependem da tensão do fluido, da concentração de sedimento em suspensão, da salinidade, do pH, temperatura, matéria orgânica e dos organismos (Burban et al., 1989).

Flocos são considerados multicompostos, pois são constituídos de diferentes tipos de partículas orgânicas e inorgânicas, em proporções diferentes. A estruturação resultante dos grãos afeta o tamanho e a velocidade de deposição do floco (Dyer, 1986). As interações que influenciam o desenvolvimento do floco são: física, por meio da turbulência, do movimento Browniano, da decantação diferenciada, do tamanho inicial da partícula, da temperatura, da concentração das partículas, das propriedades da superfície, da viscosidade e da vazão; química, devido a concentração iônica, pH, potencial redox, a presença de nutrientes e contaminantes, da proporção da composição (orgânica e inorgânica), adsorção e desorção; e biológica, por microorganismos, material fibril, colóides, matéria orgânica dissolvida e particulada, detritos e material fecal (Droppo et al., 1997).

A variação da velocidade de decantação do material floculado está relacionada com o seu tamanho, que pode ser regulado pela diferença da salinidade, pelo tipo de estrutura mineral, pela variação da concentração de sedimento em suspensão e pelas condições do fluxo (Postma, 1967; Winterwerp & Kesteren, 2004). A velocidade de decantação é uma função do tamanho e da densidade da partícula (Manning & Dyer, 1999). Partículas com baixa velocidade de decantação permanecem mais tempo em suspensão, contribuindo menos para a filtração, devido à sua baixa eficiência no tempo de retenção dentro do estuário (Schubel & Carter, 1984). Um fator que reduz a velocidade de decantação é a passagem de água através dos poros dos flocos (Droppo et al., 1997). Em suspensões com elevada concentração, a redução da velocidade de decantação de uma partícula individual pode ser causada pela influência do movimento de partículas vizinhas, impedindo ou atrasando o movimento de decantação. Isso é chamado de decantação retardada, do Inglês "*hindered settling*" (Winterwerp, 2002).

O tamanho de um floculado pode ser muito maior do que o tamanho de seus componentes individuais, como resultado, as argilas decantam mais rapidamente na forma floculada (Postma, 1967). Eisma (1986) sugere que os macroflocos (> que 125  $\mu\text{m}$ ) são formados a partir de microflocos e de minerais individuais, considerando os microflocos fortemente compactados e os macroflocos fracamente unidos. Microflocos e macroflocos são fundamentalmente diferentes e, conseqüentemente, seu comportamento é significativamente diferente. Os microflocos são onipresentes em estuários (Mikes et al., 2004).

Flocos marinhos alcançam escalas mais elevadas em suas dimensões, quando comparados com os flocos estuarinos. Isso se deve à maior concentração de conteúdo orgânico presente nas baixas turbulências no fundo oceânico (Dyer & Manning, 1999). Burban et al. (1989) observou em seus resultados com 100% de água doce, 100% de água do mar e 50% de ambas, que as partículas decantam mais rápido em água do mar do que em água doce, e que o tamanho dos flocos estuarinos é uma média ponderada dos flocos de água doce e do mar.

A consolidação do material decantado consiste na compactação dos flocos sob a influência da gravidade com a expulsão da água intersticial. A taxa de consolidação de siltes e argilas depende do tipo do argilo-mineral e do grau de floculação (Postma, 1967). A erosão desses flocos vai depender de como os flocos foram decantados, sob que condições de tensão, sua composição mineralógica, sua densidade, o pH, a salinidade, etc. Um suave aumento da resistência do processo de erosão pode estar relacionado com a produção de uma superfície incorporadora de sedimentos pela colonização de micróbios e polímeros extracelulares (Lau et al., 2001) e com as condições de fluxo que o material foi decantado (Droppo et al., 2001).

A caracterização dos parâmetros dos flocos, como o tamanho, a velocidade de decantação e a densidade, assim com seu comportamento quando em suspensão e quando depositados, são muito importantes para estudos de balanço sedimentar e de modelagem de transporte de sedimentos e contaminantes (Gibbs, 1983; Trento, 2005; Schaaff et al., 2006). Essas informações podem favorecer o planejamento do manejo dos materiais dragados de canais de navegação e a localização de regiões que possam estar impactadas por contaminantes, entre outras aplicações.

Técnicas para a observação de flocos, *in situ* e em laboratório, estão sendo desenvolvidas para investigar seu comportamento, levando em consideração suas propriedades e as variáveis ambientais. A utilização de tanques anulares está presente

em muitos desses estudos, possibilitando a realização de diferentes tipos de experimentos que podem ser realizados paralelamente aos estudos complementares de campo e de modelagem. Sob condições controladas, o processo de floculação pode ser investigado em tanques (McAnally & Mehta, 2002; Manning et al., 2007). Estudos comparativos, *in situ* e em laboratório, permitiu observar que as estruturas físicas e biológicas são importantes para determinar a resistência contra a erosão do sedimento (Widdows et al, 1998). Droppo et al. (2001) conduziu experimentos em tanque para avaliar ciclos de erosão e deposição, identificando as estruturas de deposição e a resistência à erosão. Equipamentos fundamentados em imagens de vídeo e fotografia foram utilizados no monitoramento dos flocos em laboratório (Manning & Dyer, 1999) e no campo (Eisma & Kalf, 1996; Manning & Dyer, 2002; Manning et al., 2004; Manning, 2004; Benson & French, 2007; Winter et al., 2007). Um equipamento automatizado foi desenvolvido para medir concentração, distribuição de massa e velocidade de deposição do material particulado em suspensão *in situ* (SEDVEL, Mantovanelli, 2008). Em laboratório, a construção de uma coluna de decantação, com um sistema de vídeo integrado, permite medir as propriedades dos flocos (Nobbs et al., 2002; Manning et al., 2007).

## 1.1 O ESTUÁRIO DO RIO ARARANGUÁ

A bacia hidrográfica do rio Araranguá está localizada no litoral sul do estado de Santa Catarina (Figura 1). A bacia pertence à vertente atlântica com uma área de drenagem de 3.020 km<sup>2</sup>. Suas nascentes estão localizadas junto à Serra Geral, a qual é formada por rochas sedimentares Gondwânicas de idade Paleozóica e Mesozóica (Dantas et al., 2005). Os dois principais rios formadores da bacia formam a mesobacia do rio Mãe Luzia e Itoupava, com uma área da drenagem de 1,501 km<sup>2</sup> e 1,181 km<sup>2</sup>, respectivamente (SANTA CATARINA, 1997). A agricultura, tendo o arroz como cultivo principal, e a mineração do carvão, são as principais atividades econômicas da região.

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 à sua acidez e a presença de contaminantes. Grande parte das bacias hidrográficas da região carbonífera de Santa Catarina está comprometida



qualitativamente, apresentando valores de sulfatos que chegam até  $7.000 \text{ mg.l}^{-1}$ , ferro até  $2.000 \text{ mg.l}^{-1}$  e pH com valores entre 1,5 e 3 (SANTA CATARINA, 2004). 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 são ricos em sulfeto de ferro, 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 (Fungaro & Izidoro, 2006). Nesse mesmo cenário, períodos de chuvas constantes disponibilizam grandes quantidades de grânulos finos e ultrafinos, disponíveis nos depósitos de rejeitos, para os rios intensificando o assoreamento (Milioli, 1999).

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, grande quantidade de material em suspensão é incorporada ao sistema hídrico. Além de comprometer a qualidade do sistema hídrico, essa atividade gera conflitos no que concerne à utilização da água, pois é necessário um volume elevado de água para o cultivo (SANTA CATARINA, 1997).

O estuário do rio Araranguá é altamente estratificado, dominado por rio, formado pela confluência dos rios Mãe Luzia e Itoupava, desagua no oceano Atlântico junto ao morro dos Conventos (Araranguá), onde estão presentes as formações de ilhas barreira, feição morfológica típica do trecho sul catarinense. Em uma campanha oceanográfica D'Aquino et al. (submetido) observou que o canal do estuário possui uma profundidade média de 7,5 m ao longo dos 27 km, que corresponde à distância entre a desembocadura e a cidade de Araranguá, variando da mínima de 2,5 m, próximo da desembocadura, até a profundidade máxima de aproximadamente 12 m, a 30 km a montante. Na mesma campanha, a variação do pH na superfície da água, durante todo o período de amostragem, variou entre 4,4 e 5,7. Sendo que valores mais altos de pH foram observados durante os períodos com maior salinidade, e após esse período o valor do pH diminuiu. Essa variação temporal está relacionada com o efeito tampão da água do mar devido à intrusão salina.

## **1.2 OBJETIVO**

Esse estudo tem como objetivo principal avaliar os efeitos da salinidade e do pH sobre o material particulado em suspensão do estuário do rio Araranguá. Um tanque anular foi construído e equipado para simular as condições naturais de mistura das águas dos rios formadores do estuário do rio Araranguá. No tanque foram realizados experimentos com o objetivo de investigar o comportamento do sedimento em suspensão, em simulações de processos de deposição e erosão, com variações da velocidade de fluxo na coluna de água. Em uma coluna de sedimentação equipada com um sistema de vídeo foi possível medir os parâmetros dos flocos, como: suas dimensões, velocidade de decantação e densidade efetiva.

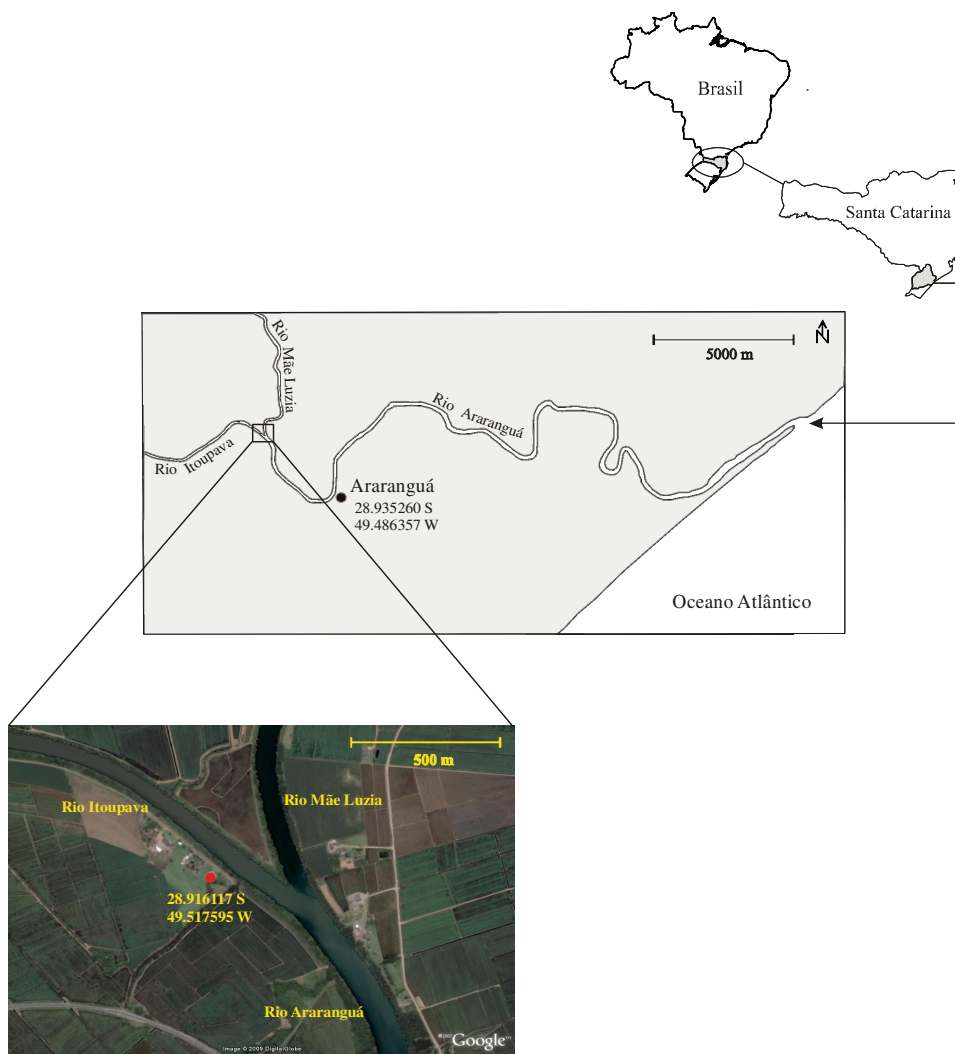


Figura 1. Mapa de Localização do estuário do rio Araranguá.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. TANQUE ANULAR

Os experimentos foram realizados em um tanque anular, de acrílico, com espessura da parede de 4 mm, diâmetro externo de 93 cm, largura do canal de 15,5 cm e altura de 35 cm (Figura 2). Sua profundidade de 30,5 cm permite um volume de água de 115 l. 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 eixo central sobre a abertura do canal, criando um fluxo contínuo a partir da superfície da água no tanque. A movimentação das pás foi alcançada por um motor elétrico, sendo que sua aceleração e desaceleração foram controladas por um inversor de frequência digital, acoplado ao motor, o que permitiu o controle da variação da velocidade média de fluxo dentro do canal entre 0 e 45  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

A velocidade da corrente no canal foi medida por um micromolinete hidrométrico (marca Ott<sup>TM</sup>), posicionado no centro do canal, e fixado na parede do tanque, a 18 cm acima da base. Dois sensores ópticos de retro-espalhamento OBS3+ (marca D&A<sup>TM</sup>), colocados na parede do tanque nas alturas de 7 cm (OBS 1) e 20 cm (OBS 2), acima da base, monitoraram a concentração do material particulado em suspensão (MPS). Tanto o molinete, como os sensores ópticos foram conectados em uma placa serial de controle programável (marca Dexter<sup>TM</sup>), 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, através de programação. Os valores de velocidade em  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  foram obtidos através da análise espectral do sinal emitido pelo micromolinete, e convertido para digital pela placa programável.

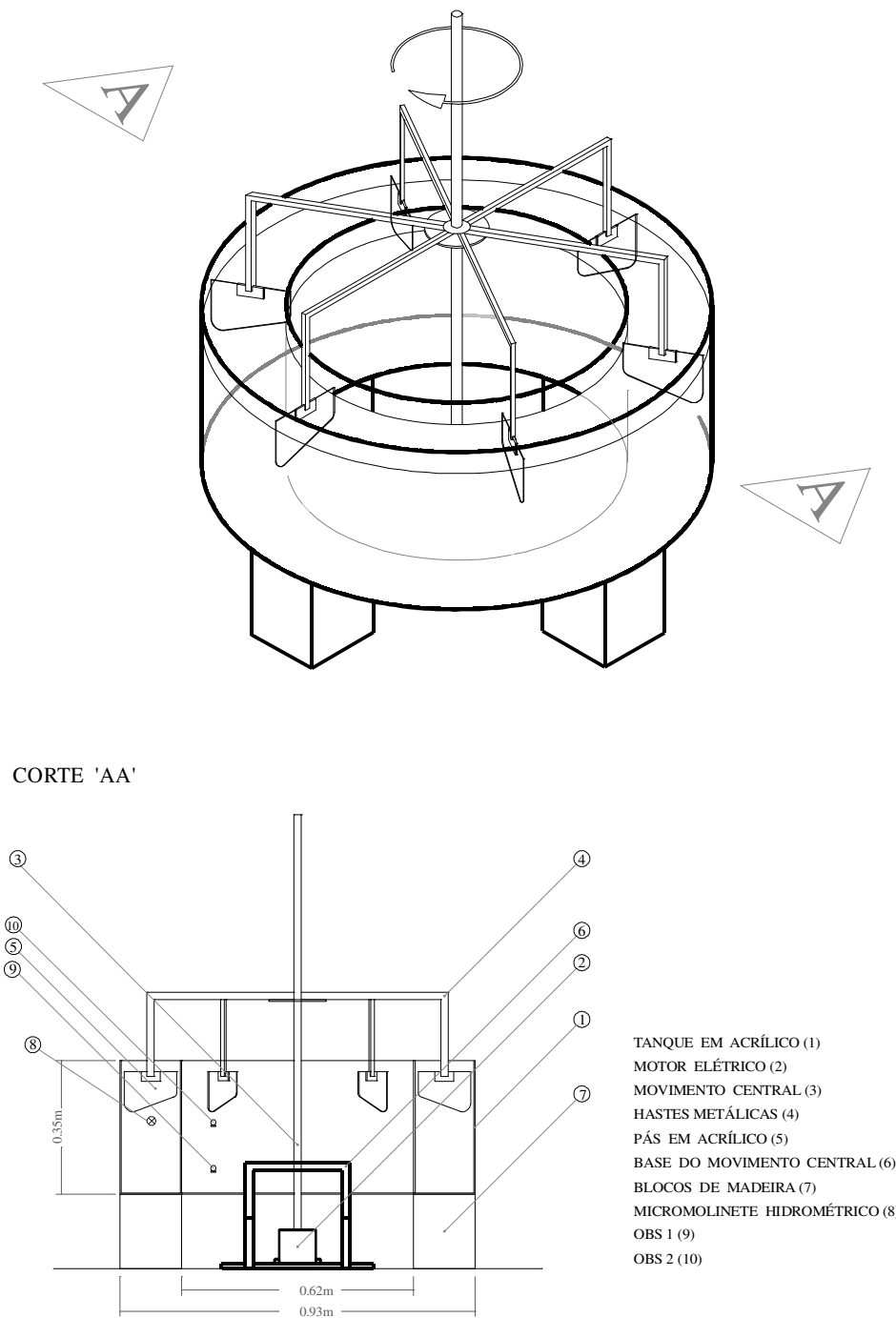


Figura 2. Perspectiva isométrica do tanque anular e sua instrumentação.

## 2.2. COLETA DO MATERIAL

Para o desenvolvimento dos experimentos, foi necessário preencher o tanque com amostras naturais da água dos rios, do mar e de sedimentos. A coleta das amostras foi realizada entre os dias 01 e 03 de agosto de 2008. O volume de água do rio

Mãe Luzia foi coletado na cidade de Forquilha, em condições não salinas e pH de 3,01. Em Taquaruçu, amostras de água do rio Itoupava foram coletadas, em condições não salinas e pH de 6,38. As amostras de água dos rios foram bombeadas e armazenadas em galões de 50 litros. Uma amostra do sedimento do leito do estuário do rio Araranguá foi coletada em uma região sob influência salina, e próxima da confluência dos rios Mãe Luzia e Itoupava. Essa amostra foi devidamente ensacada e armazenada, para ser utilizada nos experimentos em laboratório, onde foi armazenada em refrigerador e aerada horas antes do início dos experimentos. A água do mar utilizada nas diluições foi previamente filtrada.

### 2.3. MÉTODO EXPERIMENTAL

Para avaliar os efeitos da salinidade e do pH sobre o material particulado na mistura das águas dos rios, duas séries de experimentos foram realizadas, sendo que a primeira correspondeu à mistura entre as águas dos rios (série A) e a segunda consistiu na mistura entre as água dos rios e do mar (série B). Ambas as séries experimentais variaram do mesmo modo, no que reportaram-se às proporções das águas dos rios e às condições físicas (Tabela 1). Os experimentos da série A consistem apenas na mistura das águas dos rios formadores do estuário, com suas propriedades naturais, sem adição de sal. Já nos experimentos da série B, além das propriedades naturais, o sal foi introduzido na mistura, para avaliar o comportamento do sedimento em suspensão, quando há salinidade.

Tabela 1. Resumo das séries experimentais.

Experimentos	Volume do Itoupava	Volume do Mãe Luzia	Salinidade (ppm)
<b><i>série A</i></b>			
Aquecimento A	100%	0%	0
SA1	100%	0%	0
SA2	99%	1%	0
SA3	90%	10%	0
<b><i>série B</i></b>			
Aquecimento B	100%	0%	0
SB1	100%	0%	1
SB2	99%	1%	1
SB3	90%	10%	1

Cada experimento foi realizado em um dia com duração de, aproximadamente, 380 minutos. Antes de ser usado nos experimentos o sedimento passou pelo processo de aeração, aproximado de suas condições quando em suspensão no ambiente. O primeiro experimento de cada série, nomeado de aquecimento (A e B), consistiram na mistura de água 100% Itoupava com sedimento diluído em aproximadamente  $35 \text{ mg.l}^{-1}$ , onde a velocidade de fluxo variou completamente (desaceleração e aceleração), com o objetivo de aclimatar o sedimento às condições do tanque. A alta velocidade de fluxo alcançada no início dos aquecimentos contribuiu para a homogeneização do material em suspensão (Cloutier et al., 2006).

O processo de diluição do sedimento foi realizado apenas nos experimentos de aquecimento, os quais precederam os demais experimentos. A concentração inicial de sedimento nas duas etapas de aquecimento foi de aproximadamente  $35 \text{ mg.l}^{-1}$ . A opção por uma baixa concentração de sedimento em suspensão está relacionada à concentração observada no ambiente e à não ocultação dos efeitos obtidos com a mistura das águas.

As misturas, nos experimentos seguintes ao aquecimento, foram realizadas por diluições, onde um determinado volume de água do Itoupava foi retirado do tanque e um volume de água do rio Mãe Luzia foi adicionado ao tanque, até chegar à proporção pré-determinada. Nos experimentos da série B, além da água do rio Mãe Luzia, água do mar foi adicionada em um volume necessário para alcançar salinidade de 1‰. Os valores de salinidade foram checados, durante a mistura, usando um salinômetro.

Todos os experimentos iniciaram com velocidade de fluxo elevada, a qual foi diminuída em seis etapas, com intervalo de vinte minutos cada, até a velocidade zero. O tanque permaneceu em repouso por um período de três horas, e após esse intervalo, a velocidade foi aumentada em seis etapas, com intervalos de vinte minutos, até alcançar a máxima velocidade de  $45 \text{ cm.s}^{-1}$ . O que proporcionou um período de deposição (desaceleração), com a diminuição da velocidade, e um período de erosão (aceleração), com o aumento da velocidade (Figura 3).

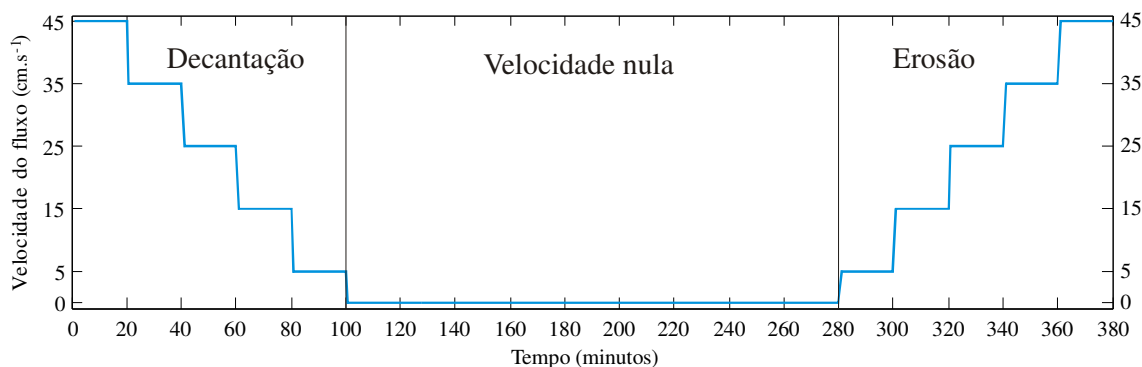


Figura 3. Representação da variação da velocidade do fluxo ao longo do tempo.

A velocidade máxima de corrente utilizada mobilizou completamente todo o sedimento. Essas variações da velocidade, que são representadas por seis etapas, tanto na desaceleração quanto na aceleração, são apresentadas nos resultados por números de 1 a 6 (Tabela 2).

Tabela 2. Velocidades de fluxo e suas etapas correspondentes.

Velocidade do fluxo (cm.s <sup>-1</sup> )	45	35	25	15	5	0
Etapas	1	2	3	4	5	6

Na primeira série, a ausência de sal teve como objetivo avaliar, somente, a mistura entre as águas dos rios, variando as proporções dos volumes de água. Para observar o efeito do sal nas misturas realizadas na primeira série, foi realizado o segundo conjunto de experimentos, onde a salinidade de 1‰ foi mantida com o objetivo de observar a consequência da presença de sal, podendo, assim, comparar as mesmas condições de mistura das águas, com e sem a presença de salinidade.

A salinidade de 1‰ foi escolhida devido à observação de registros da distribuição longitudinal da salinidade no estuário, em estudos realizados em 2006 por D'Aquino et al. (submetido), onde valores de salinidade para a região da confluência dos rios foram menores que 2‰, em períodos de alta vazão e baixa vazão. Outras três razões para utilizar uma baixa salinidade são: a utilização de um volume menor de água do mar, necessário para as diluições; a necessidade de íons em suspensão para promover a floculação, o que pode ser obtido com sal 1‰ (Gibbs, 1983), e o pressuposto de que o



baixo pH do mãe Luzia promove a floculação do material particulado em suspensão do rio Itoupava.

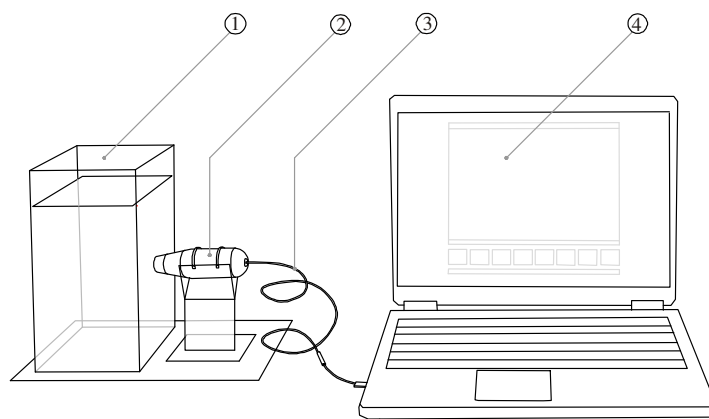
Amostras do material em suspensão foram coletadas nos mesmos níveis de posicionamento das sondas OBS para a calibração dos turbidímetros, por meio gravimétrico. O sistema utilizado para a filtração consiste em tubos com bombeamento a vácuo. Os microfiltros, de fibra de vidro Millipore<sup>®</sup>, de 47 mm foram previamente numerados, secos, dessecados e pesados. Após a filtragem das amostras, os filtros foram secos, sob temperatura de 50°C, por um período de 24 horas, dessecados e pesados, novamente, em uma balança analítica. A concentração do material em suspensão, para cada amostra, foi calculada pela diferença entre o peso do filtro seco, livre de material e pelo peso do filtro seco, com material retido.

#### **2.4. COLUNA DE DECANTAÇÃO**

Uma coluna de acrílico, com 19 cm de altura e 100 cm<sup>2</sup> de base, semelhante à utilizada por Manning et al. (2007), foi construída para a observação dos flocos e para a determinação de suas características (Figura 4). As imagens foram obtidas por um microscópio digital, de 1,3 mega pixel, da marca AVANNSCOPE MAXX<sup>™</sup>, 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 câmera não captura as correntes criadas no fundo da coluna, devido ao deslocamento dos flocos (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, de acordo com o experimento em desenvolvimento, mantendo as mesmas características da água do tanque. Eliminando, assim, a diferença da densidade dos recipientes. A cada quinze minutos, decorrente de cada etapa, amostras de sedimento em suspensão foram extraídas da superfície do tanque, com uma pipeta de vidro, de 4 mm de diâmetro interno e altura da coluna de 35,5 mm, o que corresponde a um volume da amostra de aproximadamente 0,45 ml. Essa amostra de água mais sedimento, foi transferida rapidamente do tanque para a coluna de decantação. Posicionada verticalmente, a abertura da pipeta entra em contato com a superfície de água da coluna, permitindo a decantação dos flocos na coluna pela ação da força gravitacional. Isso é possível, pois o vácuo criado no momento da

amostragem permite que o fluído permaneça estático, com o material em suspensão, decantando a partir do momento em que o ar entra na abertura oposta da pipeta. Durante todo o processo de decantação, a câmera capturou as imagens, em formato de filme, o qual pode ser monitorado através do computador.



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

Figura 4. Esquema da coluna de decantação e a transmissão dos dados.

Para as análises das imagens dos flocos, foi preciso fragmentar os vídeos em imagens individuais. O software FrameShots<sup>TM</sup> 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. Quando os flocos decantavam mais rápidos, o intervalo de tempo entre as imagens foi menor, e quando mais lentos, o intervalo foi maior. A partir de uma sequência de imagens, de um mesmo floco (Figura 5), foi possível calcular a velocidade de decantação, através da distância entre os flocos e do tempo de captura das imagens.

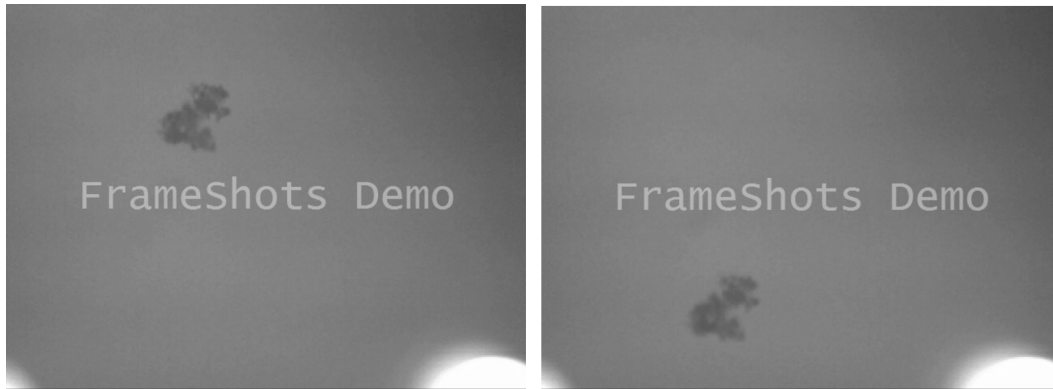


Figura 5. Sequência de imagens de um floco na coluna de decantação.

Com essas imagens, puderam ser digitalizadas as dimensões dos flocos, como o eixo longitudinal, na direção da deposição ( $D_y$ ) e o eixo perpendicular ( $D_x$ ), permitindo que o diâmetro equivalente esférico (Equação 1) pudesse ser determinado (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 às circulações secundárias (e.g., movimentos ascendentes). As dimensões reais dos flocos analisados foram baseadas em imagens calibradas, onde as dimensões verdadeiras 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:

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

onde  $W_s$  é a velocidade de decantação ( $\text{cm.s}^{-1}$ ),  $D_x$  é o diâmetro horizontal do floco (cm),  $D_y$  é o diâmetro vertical do floco (cm),  $\rho_f$  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 gravitacional ( $\text{cm.s}^{-2}$ ) e  $\mu$  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).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. EXPERIMENTOS DE DEPOSIÇÃO

As variações da concentração do MPS pelo tempo, com indicação da velocidade do fluxo em tons de azul, das etapas da deposição dos experimentos da série A e B, estão apresentadas na Figura 6A e 6B, respectivamente. No início de todas as etapas de deposição, o sedimento foi mantido em suspensão por uma elevada velocidade de fluxo, e no decorrer das etapas, essa velocidade diminuiu e o sedimento passou a se depositar. Em estuários e águas costeiras, o material em suspensão geralmente deposita em velocidades de fluxo de 10 a 15  $\text{cm.s}^{-1}$  (Eisma, 1986). Nos experimentos SA1 e SA2, a concentração de MPS diminuiu, suavemente, até o início da velocidade de 15  $\text{cm.s}^{-1}$ , a partir de onde a concentração diminuiu significativamente, com uma pequena redução nas etapas seguintes. Na etapa de velocidade de 15  $\text{cm.s}^{-1}$ , a concentração de MPS para o experimento SA3 diminuiu, sendo ainda mais acentuada quando a

velocidade diminuiu para  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ , reduzindo, quase que completamente, o material em suspensão na coluna de água.

No experimento SB1, a concentração do MPS diminui efetivamente na etapa da velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , e continua nas etapas seguintes, até reduzir em, aproximadamente, à metade de sua concentração inicial, no final do experimento. Quando o fluxo atingiu a velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , a concentração de MPS para o experimento SB2 passou a ser expressivo, chegando à velocidade zero, com uma concentração bastante baixa de material em suspensão. Em SB3, a diminuição da concentração passa a ser representativa quando a velocidade alcançou os  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , mas a diminuição é mais intensa, quando atinge a velocidade de  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ .

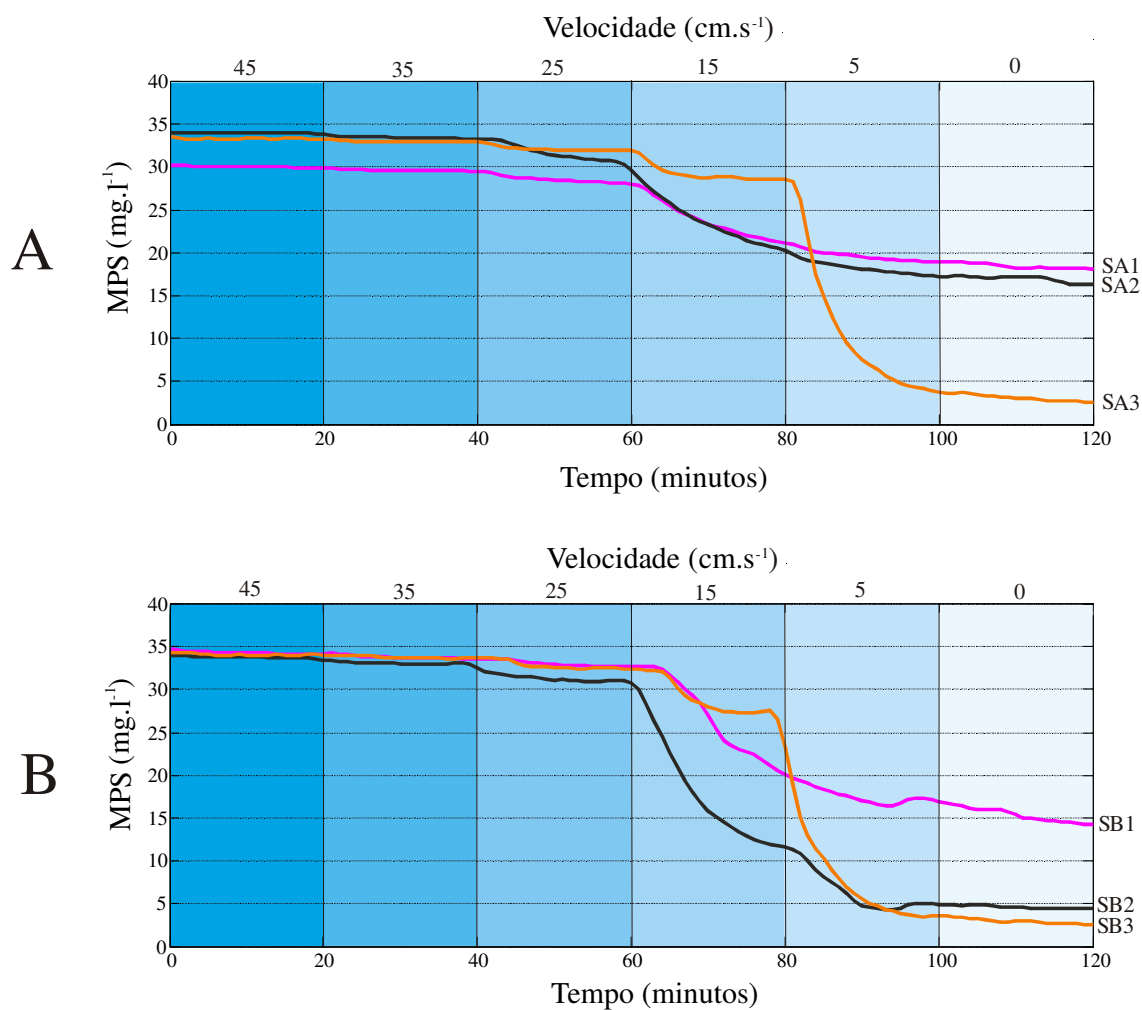


Figura 6. Séries temporais da concentração de MPS durante os experimentos da série A (gráfico superior) e série B (gráfico inferior) para as etapas de deposição. As linhas rosa, laranja e preta representam, respectivamente, os experimentos com 100% Itoupava, 1% Mãe Luzia e 10% Mãe Luzia.

A média da concentração de MPS pela velocidade de fluxo, para cada etapa da deposição, para os experimentos da série A, estão apresentados na Tabela 3 e na Figura 7. Em todos os experimentos é evidente a diminuição da concentração de MPS, conforme a velocidade de fluxo do tanque diminui. A variação do MPS nos experimentos SA1 e SA2 é bastante similar. Para uma comparação entre os experimentos, a concentração do MPS está indicada em porcentagem. Ao final das etapas de deposição, 59% do material permaneceu em suspensão, no experimento SA1, para SA2 restou 46% do material em suspensão, na coluna de água, enquanto que no experimento SA3, apenas 7% do material permaneceu em suspensão. Em observações visuais do desenvolvimento das etapas de posição, foi possível identificar a formação de grandes flocos no experimento SA3. Quando a velocidade alcançou os  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ , a água do tanque apresentou-se completamente transparente, e os flocos estavam depositados no fundo.

Tabela 3. Média da concentração de material particulado em suspensão (MPS) e da velocidade do fluxo para cada etapa da deposição dos experimentos da série A.

Experimentos	Etapas	Velocidade ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	MPS ( $\text{cm.s}^{-1}$ )
SA1	1	44,3	30
	2	33,8	29,6
	3	23,8	28,3
	4	13,9	21,7
	5	4,8	19,1
	6	0,0	17,7
SA2	1	43,9	33,9
	2	33,6	33,3
	3	23,4	31,0
	4	13,8	21,8
	5	4,7	17,4
	6	0,0	15,7
SA3	1	46,2	33,4
	2	35,6	33,1
	3	24,6	32,2
	4	14,7	28,6
	5	5,2	4,4
	6	0,0	2,4

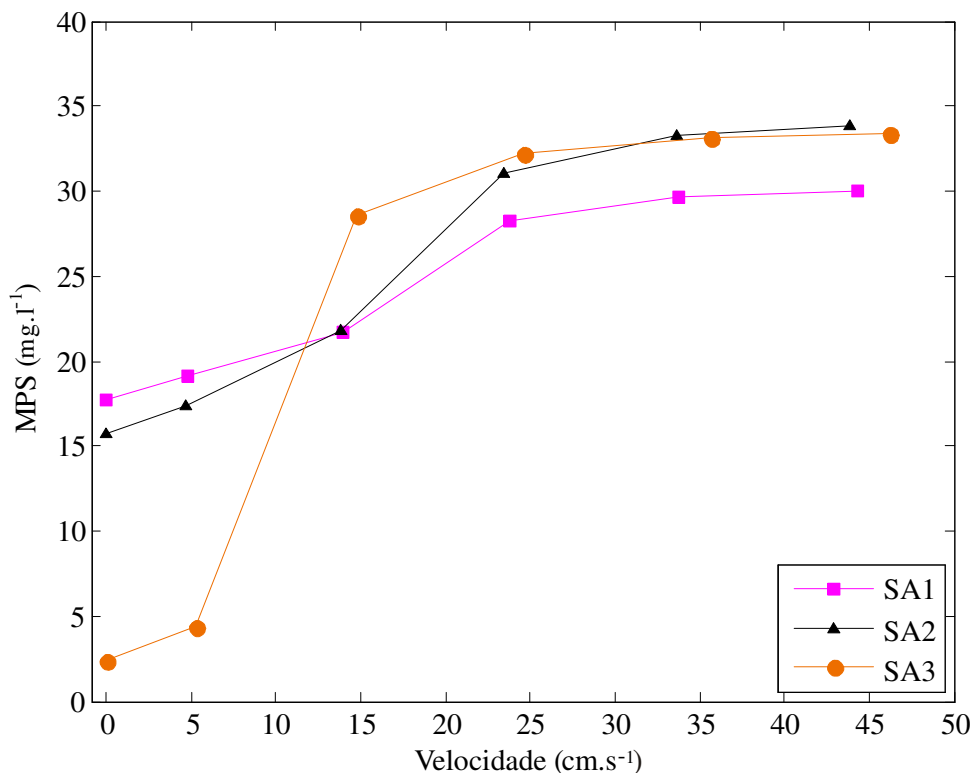


Figura 7. Variação média do MPS pela velocidade média de fluxo do tanque nas etapas de deposição para a série A.

Os valores médios da concentração de MPS pela velocidade média de fluxo, para cada etapa da deposição, para os experimentos da série B, estão apresentados na Tabela 4 e na Figura 8. A diminuição da concentração de MPS, nas três primeiras etapas, é semelhante para os experimentos da série. Na velocidade de fluxo de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , em cada experimento, o MPS passa a se comportar de forma diferente. A concentração em SB2 diminui drasticamente, enquanto que em SB1 e SB2, ela se mantém, ainda, mais elevada. Quando a velocidade diminui para  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ , a concentração no experimento SB3 caiu significativamente. Na etapa final da deposição, 42%, 12% e 7% do MPS permaneceram em suspensão, nos experimentos SB1, SB2 e SB3, respectivamente.

Tabela 4. Média da concentração de material particulado em suspensão (MPS) e da velocidade do fluxo para cada etapa da deposição dos experimentos da série B.

Experimentos	Etapas	Velocidade ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	MPS ( $\text{mg.l}^{-1}$ )
SB1	1	47,3	34,1
	2	36,2	33,6
	3	25,3	32,6
	4	14,9	25,8
	5	5,2	17,1
	6	0,0	14,5
SB2	1	46,6	33,7
	2	35,8	33,2
	3	24,9	31,4
	4	14,7	12,5
	5	5,1	5,1
	6	0,0	4,3
SB3	1	45,1	34
	2	34,6	33,7
	3	24,1	32,7
	4	14,1	28,5
	5	4,6	4,3
	6	0,0	2,4

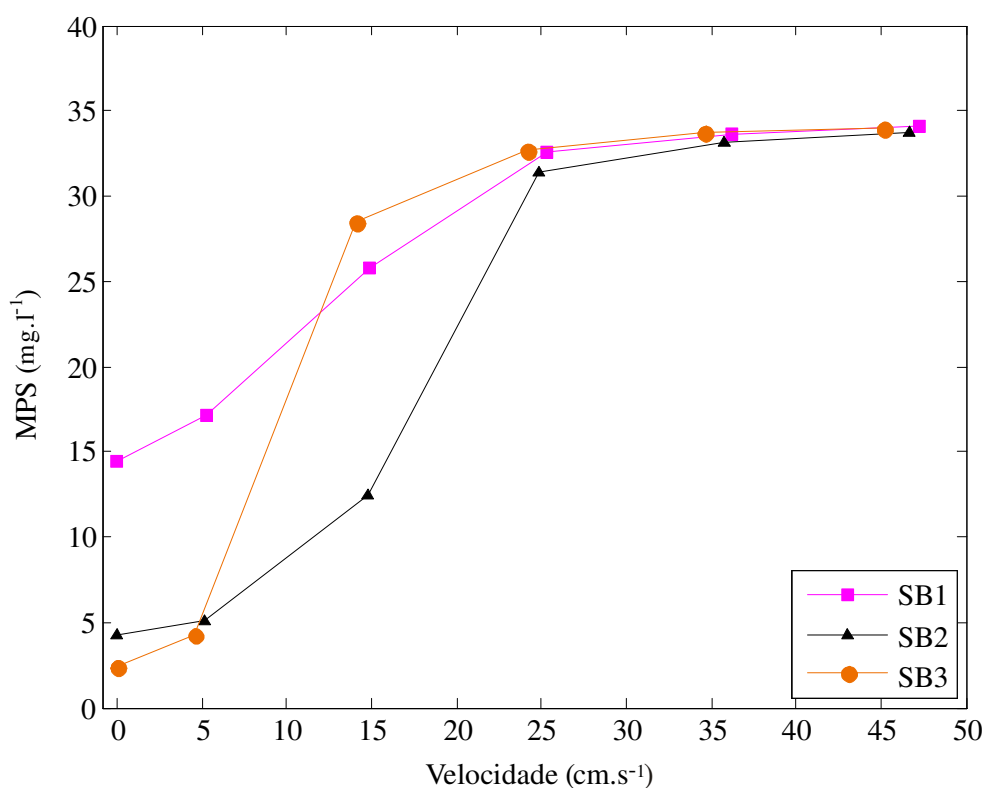


Figura 8. Variação média do MPS pela velocidade média de fluxo do tanque nas etapas de deposição para a série B.



A variação da concentração do MPS, durante o período de repouso, com a velocidade de fluxo nula, dos experimentos da série A e da série B, está apresentada nas Figuras 9 e 10, respectivamente. Em SA1 e SA2, a concentração variou muito pouco durante o período de velocidade nula. Já em SA3, a concentração permaneceu constante. O experimento que teve a maior variação, mesmo que não tenha sido tão significativa, foi no experimento SB1. Em SB2 e SB3, a concentração permaneceu estável, durante as três horas de repouso. De acordo com os resultados, podemos considerar que a suspensão é estável, no repouso, para todos os experimentos.

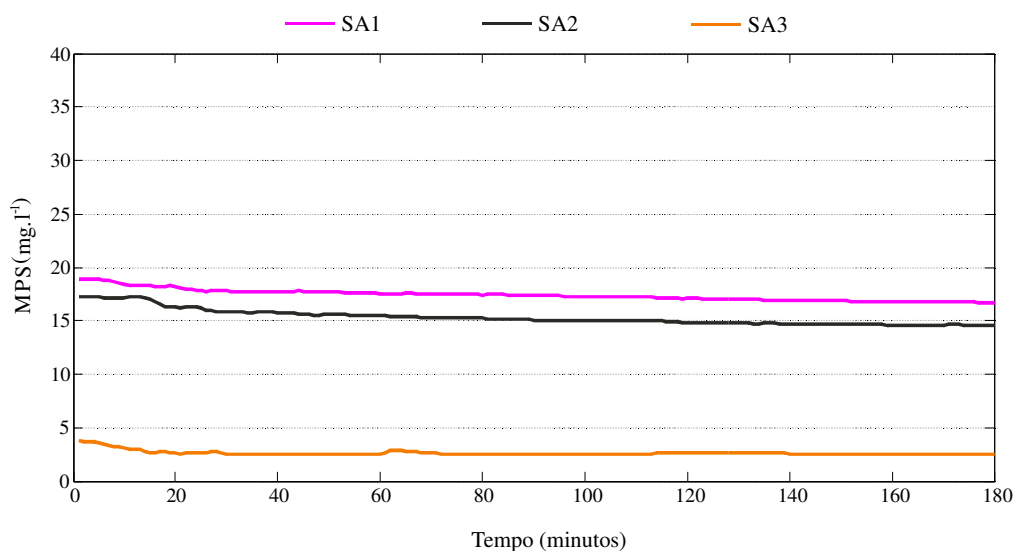


Figura 9. Variação da concentração do MPS para os experimentos da série A.

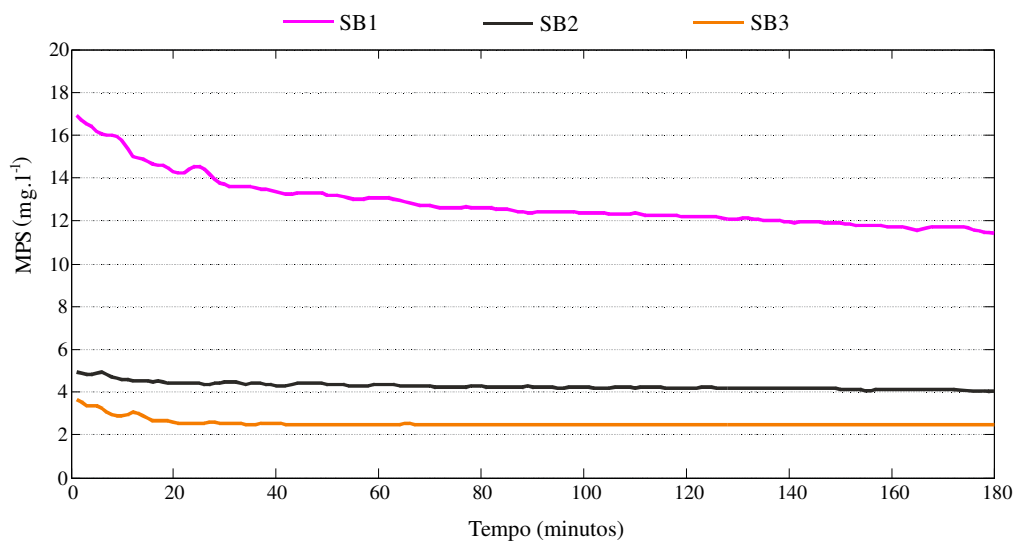


Figura 10. Variação da concentração do MPS para os experimentos da série B.

### 3.2. EXPERIMENTOS DE EROSÃO

A erosão, para todos os experimentos de ambas as séries, consistiu em seis etapas, onde a velocidade do fluxo iniciou do repouso (velocidade nula), até alcançar a velocidade de  $45 \text{ cm.s}^{-1}$ . Cada etapa teve duração de vinte minutos. Ao final dessas etapas, se completou o ciclo dos experimentos, com as etapas de deposição e erosão.

As variações da concentração do MPS pelo tempo, com indicação da velocidade do fluxo em tons de azul, no decorrer das etapas da erosão, durante os experimentos das séries A e B, estão apresentadas nas Figuras 11A e 11B, respectivamente. Para SB1 e SB2, a concentração de MPS permaneceu constante, até a velocidade atingir os  $25 \text{ cm.s}^{-1}$ . A partir dessa velocidade, o MPS passou a aumentar na coluna de água, gradativamente com o aumento da velocidade, até o final da erosão. No experimento SB3, a suspensão do material depositado teve início na velocidade de fluxo de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ . Nessa etapa, a concentração se manteve constante em, aproximadamente,  $23 \text{ mg.l}^{-1}$ , por mais da metade do tempo da etapa. Quando a velocidade alcançou os  $25 \text{ cm.s}^{-1}$ , mais material foi incorporado à coluna de água, aumentado nas duas etapas seguintes.

Em SB1 e SB2, a concentração do MPS passou a aumentar, a partir da velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$  e, assim, gradativamente, nas demais etapas, até o final da erosão. Para SB1, uma concentração maior de material particulado na coluna de água ocorreu no aumento da velocidade para  $25 \text{ cm.s}^{-1}$ , enquanto que em SB2, essa maior disponibilidade ocorreu na velocidade de  $45 \text{ cm.s}^{-1}$ . A concentração de MPS em SB3, passou a variar na velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , alcançando valores de, aproximadamente,  $20 \text{ mg.l}^{-1}$ . Na etapa seguinte, essa concentração foi ainda maior, elevando-se as duas últimas etapas. A velocidade de fluxo de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , induziu o início da remoção do material, depositado no fundo do tanque, para os experimentos da série B.

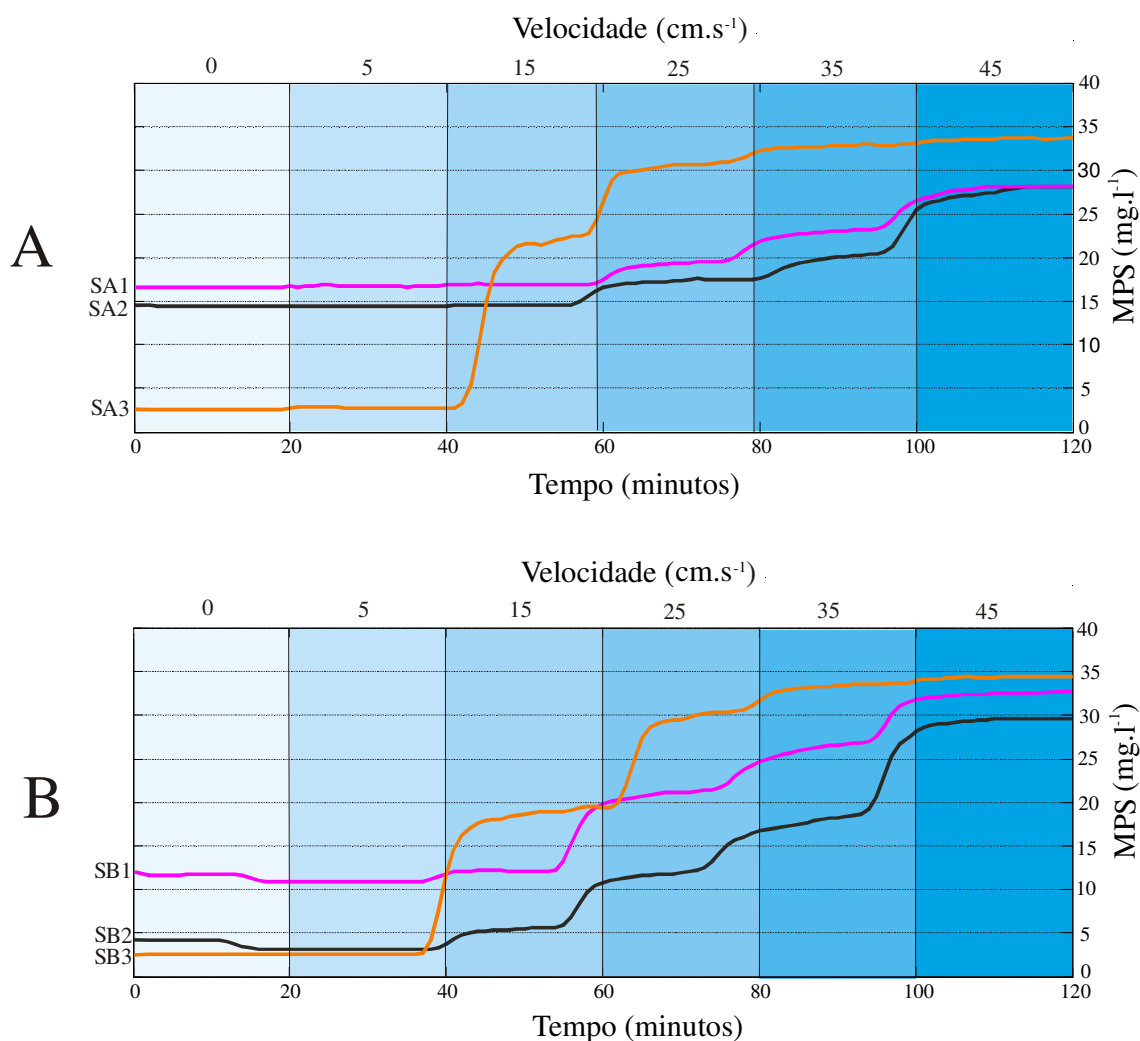


Figura 11. Séries temporais da concentração de MPS durante os experimentos da série A (gráfico superior) e série B (gráfico inferior) para as etapas de erosão. As linhas rosa, laranja e preta representam, respectivamente, os experimentos com 100% Itoupava, 1% Mãe Luzia e 10% Mãe Luzia.

Os valores médios da concentração de MPS e da velocidade de fluxo de cada etapa da erosão, para a série A, estão apresentados na Tabela 5 e na Figura 12. A erosão do material depositado, nas etapas de deposição, teve um comportamento similar nos experimentos SA1 e SA2. A suspensão do material depositado teve início na velocidade de fluxo de 25 cm.s<sup>-1</sup>. Em SA3, boa parte do material depositado passou a pertencer à coluna de água, na velocidade de fluxo de 15 cm.s<sup>-1</sup>, alcançando valores maiores nas velocidades seguintes.

Tabela 5. Média da concentração de material particulado em suspensão (MPS) e da velocidade do fluxo para cada etapa da erosão dos experimentos da série A.

Experimentos	Etapas	Velocidade ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	MPS ( $\text{mg.l}^{-1}$ )
SA1	6	0,0	16,5
	5	4,6	16,6
	4	13,7	16,8
	3	23,4	19,4
	2	33,7	23,1
	1	43,8	28,2
SA2	6	0,0	14,3
	5	4,3	14,3
	4	13,4	14,4
	3	23,1	17,5
	2	33,2	20,2
	1	43,4	28,2
SA3	6	0,0	2,4
	5	5	2,6
	4	14,4	23,4
	3	24,4	31,4
	2	35,2	33,1
	1	45,8	33,7

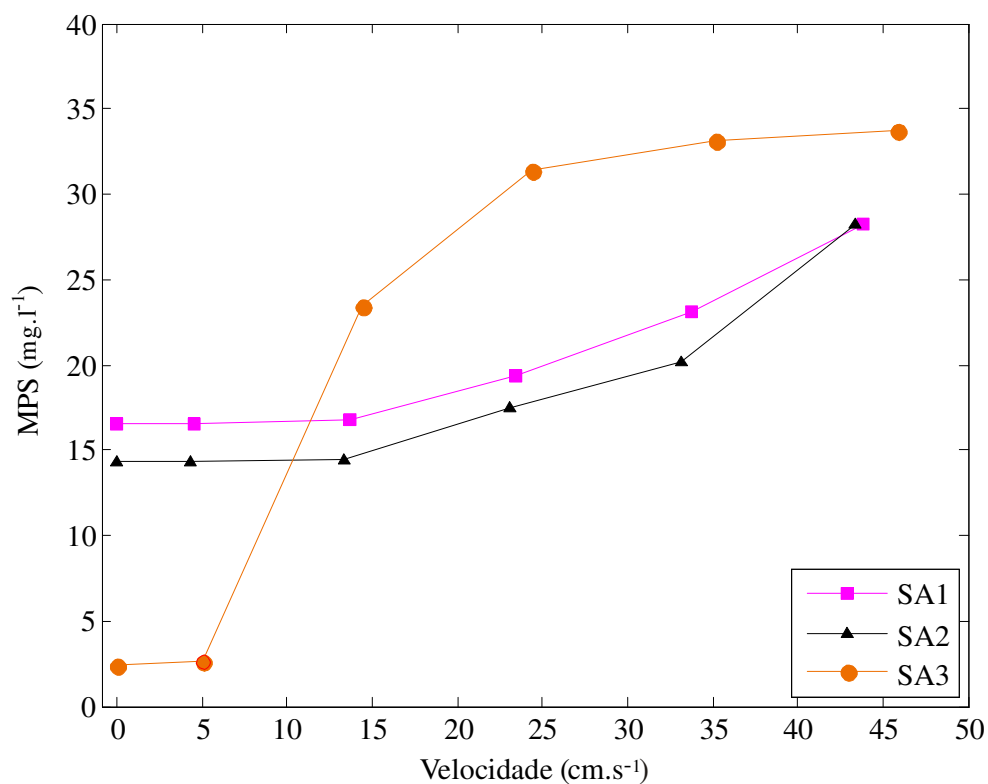


Figura 12. Variação média do MPS pela velocidade média de fluxo do tanque nas etapas de erosão para a série A.

Os valores médios da concentração de MPS e da velocidade de fluxo, de cada etapa da erosão, para a série B, estão apresentados na Tabela 6 e na Figura 13. A erosão do material, nos experimentos SB1 e SB2, tiveram início na velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , com aumentos graduais do material, na coluna de água, nas etapas seguintes. Grande parte do material depositado, no experimento SB3, foi removido do fundo, na velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , sendo que a erosão foi mais efetiva, na velocidade de  $25 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Tabela 6. Média da concentração de material particulado em suspensão (MPS) e da velocidade do fluxo para cada etapa da erosão dos experimentos da série B.

Experimentos	Etapas	Velocidade ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	MPS ( $\text{mg.l}^{-1}$ )
SB1	6	0,0	11,7
	5	4,9	10,8
	4	14,6	12
	3	24,9	21,1
	2	36,1	26,6
	1	46,7	32,5
SB2	6	0,0	4,0
	5	4,9	3,1
	4	14,6	5,6
	3	24,6	11,9
	2	35,5	18
	1	46,1	29,6
SB3	6	0,0	2,3
	5	4,3	2,3
	4	13,8	20,2
	3	23,7	30,8
	2	34,3	33,8
	1	44,9	34,4

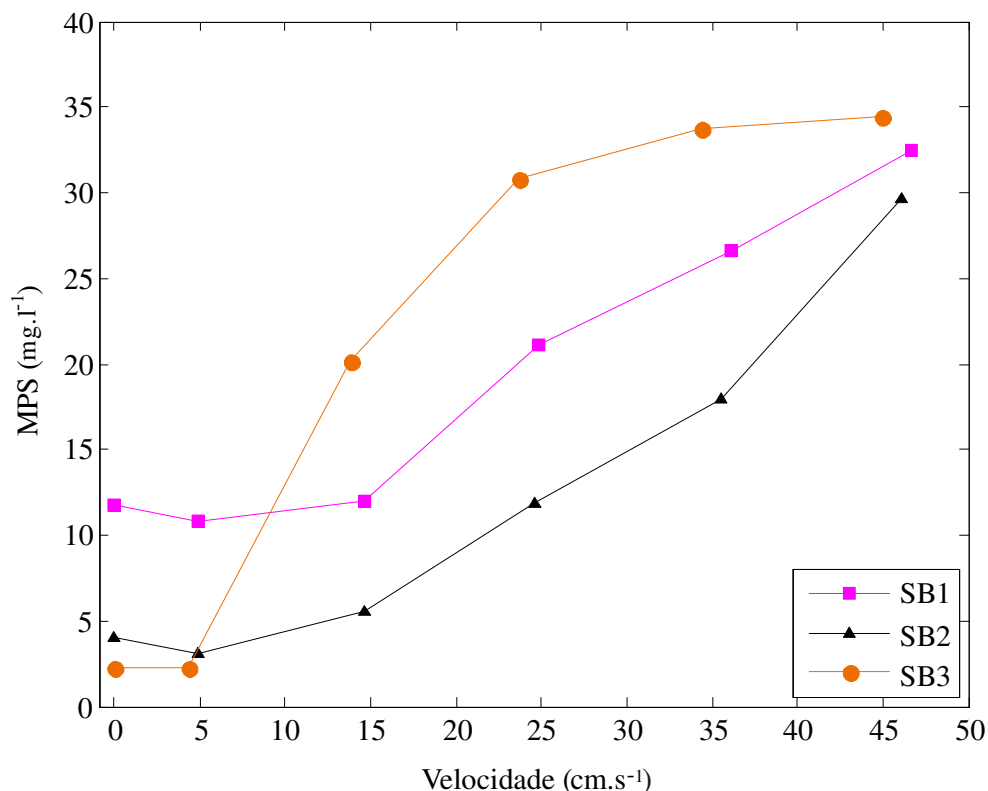


Figura 13. Variação média do MPS pela velocidade média de fluxo do tanque nas etapas de erosão para a série B.

### 3.3. CARACTERÍSTICAS DOS FLOCOS

Uma síntese dos valores médios do tamanho e da velocidade de decantação dos flocos gerados nas fases da deposição, da série A e série B, estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Conforme a velocidade do fluxo diminui, com o transcorrer das fases, uma menor, ou uma maior quantidade de flocos foi capturada. A partir desses números, os valores médios foram obtidos, assim com o seu desvio padrão. A ausência de dados está atribuída à ausência de flocos na amostra.

Em grande parte dos resultados do valor médio para o tamanho, em todos os experimentos, foram bastante dispersos, o que está relacionado com a variabilidade entre os dados. No caso dos valores da velocidade de decantação, essa variabilidade é menor. Os experimentos da série A e B não apresentaram uma relação entre o tamanho dos flocos e a diminuição da velocidade de fluxo. Da mesma forma, a velocidade de decantação dos flocos não possui uma relação com o tamanho do floco. Para o experimento SA1, a presença de microflocos ocorre quando a velocidade diminui para 15 cm.s<sup>-1</sup>. Em SA2, a presença de microflocos predomina, sem que haja uma tendência.

Quando mais volume do rio Mãe Luzia é adicionado, experimento SA3, a formação de microflocos ocorre a partir da primeira fase ( $45 \text{ cm.s}^{-1}$ ), prevalecendo nas fases seguintes com tamanho máximo na velocidade de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Em comparação com os flocos formados nos experimentos da série A, os flocos gerados nos experimentos da série B possuem maior velocidade de decantação. Já em relação ao tamanho dos flocos, a diferença não é tanta. Em SB3, a ocorrência de microflocos se dá quando a velocidade cai para  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Tabela 7. Número de flocos, tamanho médio e velocidade média de decantação de cada etapa dos experimentos da série A para a etapa de deposição (desaceleração).

Experimentos	Etapas	Número de flocos	Tamanho médio ( $\mu\text{m}$ )	Velocidade de decantação média ( $\text{mm.s}^{-1}$ )
SA1	1	6	$80,5 \pm 24,5$	$2,3 \pm 0,4$
	2	4	$89,2 \pm 32,9$	$1,6 \pm 0,2$
	3	2	$89,1 \pm 15,5$	$1,0 \pm 0,1$
	4	5	$175,6 \pm 72,9$	$1,4 \pm 0,7$
	5	5	$66,4 \pm 12,3$	$0,8 \pm 0,26$
	6	1	73,7	3,1
SA2	1	23	$82,0 \pm 25,5$	$0,4 \pm 0,1$
	2	12	$65,5 \pm 16,0$	$0,4 \pm 0,1$
	3	7	$55,3 \pm 14,4$	$1,0 \pm 0,1$
	4	8	$70,0 \pm 19,1$	$0,5 \pm 0,2$
	5	11	$75,5 \pm 17,6$	$1,2 \pm 0,5$
	6	5	$84,8 \pm 14$	$1,6 \pm 1,5$
SA3	1	20	$194,8 \pm 91$	$0,8 \pm 0,1$
	2	14	$176,2 \pm 63,3$	$1,2 \pm 0,3$
	3	8	$192,8 \pm 79,2$	$0,9 \pm 0,1$
	4	8	$257,0 \pm 94$	$2,0 \pm 0,2$
	5	5	$188,2 \pm 75,9$	$0,7 \pm 0,3$
	6	2	$239,4 \pm 47,6$	$1,0 \pm 0,1$

Tabela 8. Número de flocos, tamanho médio e velocidade média de decantação de cada etapa dos experimentos da série B para a etapa de deposição (desaceleração).

Experimentos	Etapas	Número de flocos	Tamanho médio ( $\mu\text{m}$ )	Velocidade de decantação média ( $\text{mm.s}^{-1}$ )
SB1	1	21	$77,7 \pm 18,1$	$3,8 \pm 1,5$
	2	8	$82,6 \pm 34$	$3,5 \pm 1,1$
	3	11	$55,8 \pm 27,4$	$2,4 \pm 0,1$
	4	6	$112,2 \pm 18,1$	$4,5 \pm 1,7$
	5	2	$86,8 \pm 13,6$	$3,7 \pm 1$
	6	-	-	-
SB2	1	15	$89,3 \pm 28,1$	$2,0 \pm 0,2$
	2	9	$99,3 \pm 17,2$	$1,3 \pm 0,4$
	3	10	$128,1 \pm 47,9$	$2,6 \pm 0,8$
	4	4	$164,0 \pm 29,6$	$3,3 \pm 1,8$
	5	5	$106,1 \pm 18,7$	$4,1 \pm 1,4$
	6	-	-	-
SB3	1	20	$91,1 \pm 38,5$	$1,8 \pm 0,6$
	2	9	$115,5 \pm 35$	$3,7 \pm 1,8$
	3	11	$92,4 \pm 33$	$4,2 \pm 1,4$
	4	14	$199,9 \pm 87,3$	$2,6 \pm 0,5$
	5	-	-	-
	6	-	-	-

Um resumo dos valores médios do tamanho e da velocidade de decantação dos flocos gerados nas fases da erosão, da série A e série B, estão apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Em SA1, houve um aumento do tamanho dos flocos conforme a velocidade do fluxo aumentou. Nos outros experimentos essa analogia para as fases da erosão não esteve presente. No início do experimento SA3, quando a velocidade de fluxo alcançou os  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ , um macrofoco foi amostrado na superfície.

Nos experimentos da série B, os flocos foram amostrados a partir da fase de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ . Em SB1, conforme a velocidade aumentou, o tamanho dos flocos diminuiu, prevalecendo os microfocos em todas as fases. Para SB2, a variação, entre as fases, foi pouca no que diz respeito aos valores do tamanho. A predominância de macrofocos em SB3 está presente em todas as fases.



Tabela 9. Número de flocos, tamanho médio e velocidade média de decantação de cada etapa dos experimentos da série A para a etapa de erosão (aceleração).

Experimentos	Etapas	Número de flocos	Tamanho médio ( $\mu\text{m}$ )	Velocidade de decantação média ( $\text{mm.s}^{-1}$ )
SA1	6	-	-	-
	5	-	-	-
	4	-	-	-
	3	1	79,3	1,84
	2	4	$120,5 \pm 65,2$	$2,6 \pm 0,1$
	1	3	$136,6 \pm 2,12$	$2,4 \pm 0,9$
SA2	6	-	-	-
	5	3	$97,6 \pm 29$	$1,3 \pm 0,7$
	4	1	77	1,6
	3	3	$74,1 \pm 17,7$	$1,0 \pm 0,2$
	2	5	$140,5 \pm 29,6$	$5,1 \pm 1,5$
	1	6	$135,8 \pm 60,9$	$2,8 \pm 0,9$
SA3	6	-	-	-
	5	1	330,4	0,2
	4	4	$114,8 \pm 62,9$	$4,0 \pm 2,1$
	3	3	$228,0 \pm 148,5$	$4,3 \pm 3$
	2	12	$174,6 \pm 77,5$	$2,9 \pm 0,9$
	1	9	$180,4 \pm 56,5$	$4,0 \pm 0,8$

Tabela 10. Número de flocos, tamanho médio e velocidade média de decantação de cada etapa dos experimentos da série B para a etapa de erosão (aceleração).

Experimentos	Etapas	Número de flocos	Tamanho médio ( $\mu\text{m}$ )	Velocidade de decantação média ( $\text{mm.s}^{-1}$ )
SB1	6	-	-	-
	5	-	-	-
	4	1	125,3	3,7
	3	3	$103,8 \pm 24$	$2,4 \pm 1,5$
	2	12	$85,7 \pm 22,8$	$3,6 \pm 1,7$
	1	11	$66 \pm 10$	$2,5 \pm 0,5$
SB2	6	-	-	-
	5	-	-	-
	4	2	$92,9 \pm 19,4$	$1,6 \pm 1$
	3	3	$96,1 \pm 6,7$	$2,3 \pm 0$
	2	3	$102,8 \pm 40,9$	$1,7 \pm 0,6$
	1	20	$102 \pm 41,3$	$3 \pm 0,6$
SB3	6	-	-	-
	5	-	-	-
	4	6	$185 \pm 48,4$	$1,8 \pm 0,7$
	3	9	$184,2 \pm 50$	$3,5 \pm 0,7$
	2	17	$194,6 \pm 73,2$	$3,4 \pm 1$
	1	9	$162,3 \pm 55,4$	$2,4 \pm 1,4$

A distribuição dos microflocos e do macroflocos, presente nos experimentos das duas séries de experimentos, está representada na Figura 14. Essa relação consiste no cálculo da porcentagem dos flocos, de acordo com o total de flocos analisados por experimento. Foram considerados como sendo microflocos, os que possuem diâmetro inferior a 125  $\mu\text{m}$  e macroflocos, os maiores que 125  $\mu\text{m}$  (Eisma, 1986).

Aproximadamente 64% de todos os flocos analisados, nas duas séries experimentais, são microflocos, os quais representaram grande parte dos flocos, nos dois primeiros experimentos, em ambas as séries. Já em SA3 e SB3, os macroflocos foram predominantes, em relação aos microflocos.

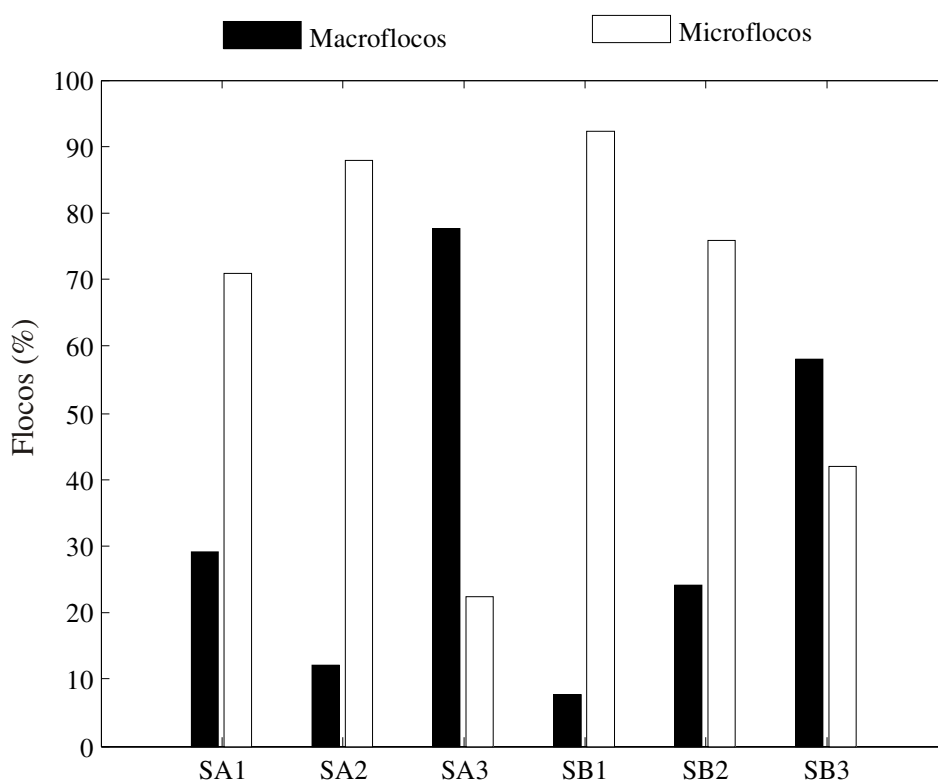


Figura 14. Mostra a porcentagem de macroflocos e microflocos de todos os experimentos das séries A e B.

#### 4. DISCUSSÃO

As etapas de deposição e erosão determinaram a dinâmica de cada experimento, onde o comportamento do material particulado em suspensão foi analisado. A partir desses testes, a concentração de MPS, a salinidade, o pH e a velocidade de fluxo (tensão turbulenta) controlaram o processo de floculação, em diferentes escalas.

A elevada velocidade de fluxo, no início das etapas de deposição, permitiram que as partículas permanecessem em suspensão, na coluna de água, até que em uma determinada velocidade de fluxo, parte, ou todo esse material floculou e depositou-se, gradualmente. A tensão turbulenta, gerada na coluna de água, promove a colisão entre as partículas em suspensão, e a adesão entre elas, consolida a formação dos flocos. Em seus estudos, Manning & Dyer (1999) geraram a hipótese de que, em baixas tensões e baixas concentrações, a floculação é intensificada. Em condições de baixa concentração de sedimento em suspensão, velocidades de fluxo, abaixo de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , favoreceram o processo de floculação e a deposição dos flocos, para os experimentos SA1, SA2, SB1 e SB2. Já nos experimentos SA3 e SB3, a floculação e a deposição dos flocos ocorrem mais intensamente, quando a velocidade de fluxo diminuiu para  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ .

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. Indicando que a salinidade contribuiu com a remoção do material em suspensão. Nos experimentos com 10% Mãe Luzia, todo o material em suspensão foi floculado, em baixa velocidade de fluxo. Segundo Milligan (1995), essa desobstrução é afetada pela agregação de uma população estável de partículas floculadas, com a diminuição da velocidade de fluxo.

Durante as etapas de deposição, 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 a praticamente a mesma. Em trabalhos realizados por Döbereiner (1982), Bale et al. (2002), Mikes et al. (2004) e Manning (2004), a salinidade não teve um papel decisivo no processo de floculação do material

particulado, sendo que a velocidade de fluxo e a concentração de MPS exerceram maior importância para o processo.

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.

A água do rio Mãe Luzia é caracterizada pelos seus baixos valores de pH, altos índices de acidez e pela presença de sulfatos e metais pesados (SANTA CATARINA, 1997), devido ao sistema do rio apresentar uma área caracterizada pela atividade de beneficiamento do carvão, a qual contribui com a poluição hídrica, gerando a drenagem ácida.

Essa variação, da salinidade e do pH da água, alteram o potencial eletrolítico das partículas em suspensão. Os argilo-minerais possuem potencial elétrico negativo. Junto à superfície forma-se uma camada de cátions fortemente aderidos, e uma outra camada de cátions difusos, com uma menor presença de ânions. Essa configuração é denominada de camada dupla. A concentração total de íons circundantes na água e o pH podem determinar a espessura da camada dupla. Caso o potencial eletrolítico diminua, abaixo de um certo valor crítico, ocorre a floculação (Postma, 1967).

O processo de floculação altera a hidrodinâmica das partículas constituintes, alterando o comportamento do transporte do sedimento e das partículas contaminantes, que estão aderidas aos flocos (Droppo et al., 1997). Essas partículas floculadas promovem deposição e, conseqüentemente, a retenção de sedimentos finos no estuário (Döbereiner, 1982). No contexto do balanço sedimentar do estuário do rio Araranguá, a floculação passa a reter sedimento fornecido pelo sistema fluvial da bacia, que por sua vez aumenta a eficiência da filtração no estuário (Kranck, 1984). Se tratando de um conjunto de processos costeiros, o material que seria transportado pelo rio passa a ser aprisionado no sistema estuarino, deixando de contribuir para o balanço sedimentar e, por conseqüência, na manutenção da estabilidade da linha de costa.

Durante o período de repouso, que se estendeu por três horas, a estabilidade da suspensão foi observada em todos os experimentos das duas séries. Nesse período, o processo de decantação depende do tamanho, da forma e da densidade dos flocos, que permanecem em suspensão (Pfeiffer, 1996). O material depositado, ao

final das etapas de deposição, sofreu o processo de erosão, conforme a velocidade do fluxo foi aumentando. A velocidade que promove a erosão do sedimento é atrasada, até que uma velocidade crítica seja alcançada. Em tal ponto, a concentração de sólidos aumenta, rapidamente, até que todo o material decantado seja erodido e misturado na coluna de água (Bale et al., 2002). A concentração de MPS dos experimentos aumentou, 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 de ressuspender parte do material depositado.

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. A bioestabilização pode ser definida como o processo no qual microorganismos crescem e produzem substâncias polímeras extracelulares, associados a outros organismos colonizadores do sedimento, tais como: fungo e algas, resultando na estabilidade da união, entre as partículas individuais e os flocos (Droppo et al., 2001).

A relação, entre o tamanho e a velocidade de decantação de todos os flocos analisados nos experimentos, está representada na Figura 15. A velocidade de decantação varia, em ordem de magnitude, entre  $0,24$  e  $8 \text{ mm.s}^{-1}$ , e o tamanho dos flocos, entre  $32,5$  e  $448,5 \text{ }\mu\text{m}$ . Em ambas as séries de experimentos, existe uma grande dispersão dos valores, de tamanho e velocidade de decantação dos flocos. Observada essa relação, não é possível verificar uma tendência da velocidade de decantação, em relação ao tamanho do floco, uma vez que em uma mesma faixa de valores de tamanho, existe uma ampla faixa de valores de velocidade de decantação.

Em geral, grande parte dos flocos gerados nos experimentos, com adição de sal, apresentaram velocidades de decantação maiores que as dos flocos gerados em água doce. Esse 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. Essas elevadas velocidades de decantação, nos experimentos da série B, podem indicar um ótimo nível de colisões entre partículas (Manning et al., 2007).

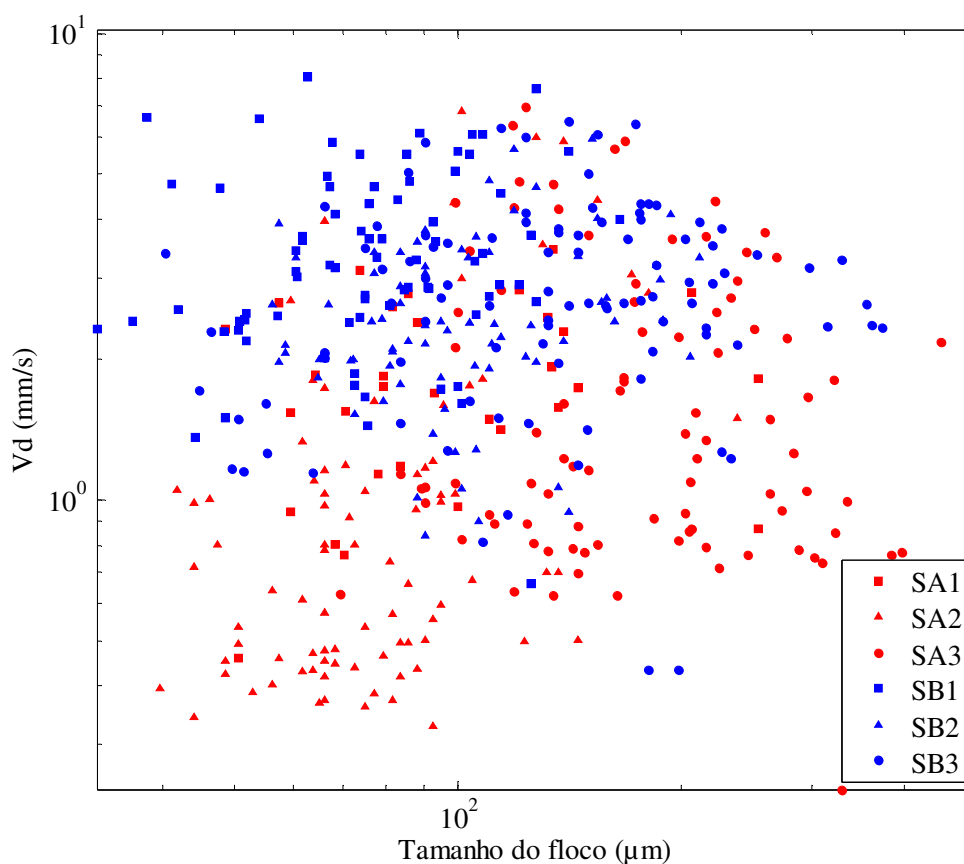


Figura 15. Relação entre o tamanho e a velocidade de decantação ( $V_d$ ) de flocos individuais dos experimentos da série A e B.

A relação entre a densidade efetiva e o tamanho do floco, para os experimentos das duas séries, está representada na Figura 16. Os valores da densidade efetiva variaram, em ordem de magnitude, entre  $0,004$  a  $9,8 \text{ g.m}^{-3}$ . Observando os dados, é possível identificar uma clara tendência dessa relação, mesmo que exista uma ampla dispersão entre os valores. Com o aumento do tamanho, a densidade efetiva dos flocos diminui. Essa tendência corrobora para uma relação não linear, entre a velocidade de decantação e o tamanho do floco (Gibbs, 1985).

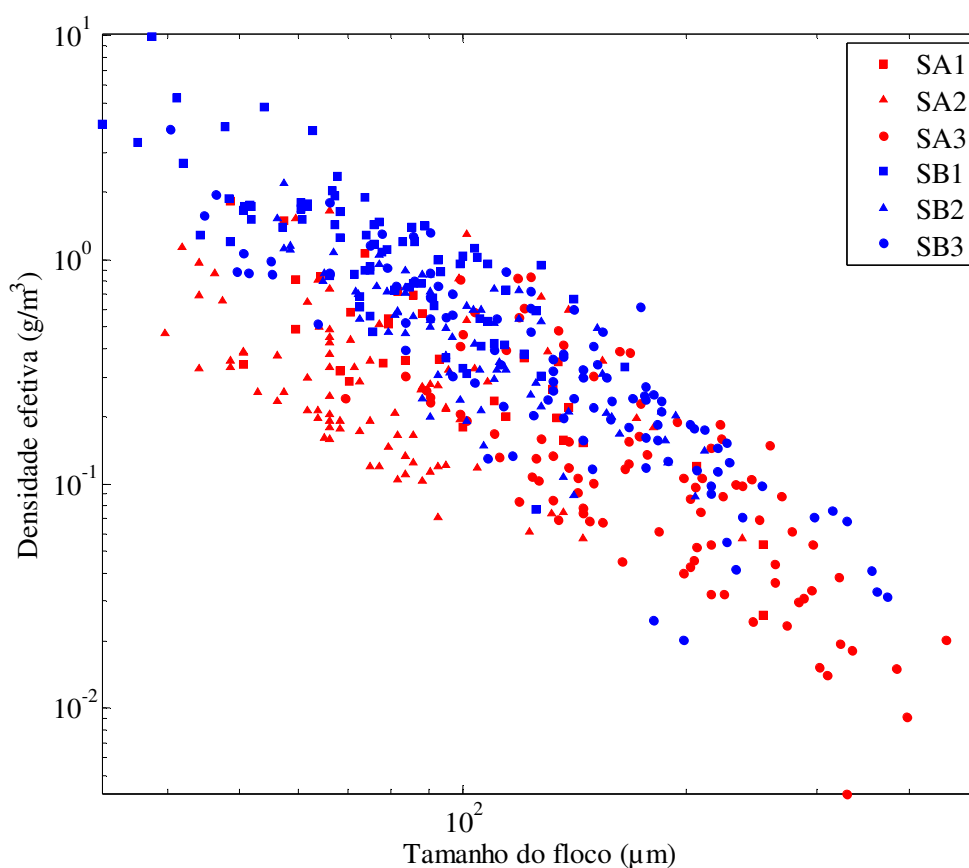


Figura 16. Relação entre o tamanho e a densidade efetiva de flocos individuais dos experimentos da série A e B.

Entre as séries, os flocos formados nos experimentos com sal, obtiveram maiores densidades. Esses flocos, com estrutura mais densa, podem ter suas partículas constituintes recompostas em sua formação, devido a fatores como: a salinidade, o pH, a velocidade turbulenta e ao gradiente da velocidade de decantação das partículas (Döbereiner, 1982). Em geral, a dispersão dos valores de densidade é maior para os flocos menores. Existe uma ampla variação, entre densidades efetivas mais altas e mais baixas. No caso dos macroflocos, a densidade efetiva tende a ser inferior a  $0,5 \text{ gm}^3$ , com menor dispersão (Manning et al., 2007). Com essas observações, a mistura, de 10% de Mãe Luzia, com 90% de Itoupava, resulta na formação de flocos menos densos e, visivelmente, maiores. Em estuários, os macroflocos maiores que o normal, estão normalmente presentes na zona de turbidez máxima, somente em baixas velocidades, e em áreas perto do fundo, ou, também, durante as estofas de maré, em posições mais elevadas da coluna de água (Eisma, 1986).

Observando os gráficos de dispersão (Figura 15 e 16), 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), em estudos de aquisição de imagens, *in situ*, no estuário Gironde, com o INSSEV, que é um equipamento que mede o tamanho, a velocidade de decantação e a densidade efetiva dos flocos; por Manning (2004), no estuário Tamar, em experimentos realizados, *in situ*, com o INSSEV e por Manning et al (2007), em experimentos em laboratório com lama do estuário Medway.

Essa heterogeneidade dos parâmetros dos flocos está relacionada, tanto com as condições físico-químicas da água do tanque, devido às diferentes misturas das águas e a adição de sal, quanto com as variações da velocidade de fluxo que o sedimento esteve sujeito, ao longo das etapas de deposição, repouso e erosão. Inúmeras mudanças nas propriedades dos flocos são promovidas pela floculação e defloculação (Manning & Dyer, 1999), devido às adversas condições no tanque. Esses processos são considerados reversíveis (Duinker, 1980).

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Comparando SA2 e SA3, com SA1, é possível observar que o aumento da quantidade de água do rio Mãe Luzia favorece o processo de floculação, e que esse processo é mais eficiente com 10%. Sugerindo, assim, que o baixo pH presente na água do rio Mãe Luzia é um dos fatores intensificadores do processo de floculação no estuário do rio Araranguá. A presença do sal nos experimentos da série B resultou em uma aceleração mais branda da deposição do MPS e da floculação.

As características dos flocos como tamanho, velocidade de decantação e densidade efetiva, apresentaram características diferentes, entre as duas séries de experimentos. Os microflocos, menores que 125  $\mu\text{m}$ , 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.



A porção inferior do estuário é caracterizada pela transparência da água do rio Araranguá, o que pode ser explicado pelo processo de floculação e decantação do material floculado, que ocorre em sua porção mais a montante, na região da confluência dos rios Itoupava e Mãe Luzia.

A partir desse conjunto de medidas laboratoriais é possível concluir que a floculação ocorre no estuário do rio Araranguá, e que os fatores que favorecem esse processo estão relacionados à: baixo pH da água do rio Mãe Luzia; baixa concentração de sedimento em suspensão e baixa velocidade de fluxo.

Para um melhor entendimento dos processos que ocorrem no estuário e a sua dinâmica, são necessários estudos realizados, *in situ*, gerando, assim, dados para comparações com os estudos laboratoriais. Essas comparações irão fornecer informações necessárias, para avaliar o quão eficiente é o tanque na realização de pesquisas, com sedimentos coesivos.

A aplicação dos resultados, em modelos numéricos, também, ajuda a compreender melhor o comportamento dos sedimentos coesivos no estuário, uma vez que todas as suas variações podem ser controladas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYUP, R. N. Intercâmbio sedimentar entre o Rio de la Plata Exterior e a plataforma continental adjacente. **Pesquisas**, Porto Alegre, n.19, p. 105-126, 1987.

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**, Netherlands, v. 40, n. 4, p. 555-565, 2006.

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. (Ed.). **Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment**. Elsevier Science, 2002. p. 189-201.

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.

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, 2000. p. 271-439.

BURBAN, P. Y.; LICK, W.; LICK, J. The flocculation of fine-grained sediments in estuarine waters. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. C6, p. 8323-8330, 1989.

DANTAS, M. E.; GOULART, D. R.; JACQUES, P. D.; ALMEIDA, I. S.; KREBS, A. S. J. Geomorfologia Aplicada à Gestão Integrada de Bacias de Drenagem: Bacia do Rio Araranguá (SC), Zona Carbonífera Sul - Catarinense. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. **Anais...do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2005. p. 1-20.

DÖBEREINER, Christian. **Aggregation and deposition of fine particles in the Tay estuary**. 1982. 151 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Faculty of Science in the University of Dundee, Scotland, UK, 1982.

DROPPO, 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. **Water, Air and Soil Pollution**, Netherlands, v. 99, p. 43-54, 1997.

DROPPO, 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.

DUINKER, J.C. Suspended matter in estuaries: adsorption and desorption processes. In: OLAUSSON, E. & CATO, I. (Eds.) **Chemistry and biogeochemistry of estuaries**. New York, John Wiley and Sons, p. 121-151, 1980.

DYER, K. R. **Coastal and estuarine sediment dynamics**. New York, John Wiley and Sons, 1986. 342p.

DYER, K. R.; MANNING, A. J. Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions. **Journal of Sea Research**, v. 41, p. 87-95, 1999.

D'AQUINO, C. A.; SCHETTINI, C. A. F.; PEREIRA FILHO, J. (submetido) Fluvial modulation and salt transport in a highly stratified estuary. **Brazilian Journal of Oceanography**.

EISMA, D. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. **Netherlands Journal of Sea Research**, v. 20, p. 183-199, 1986.

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.

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.

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.

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.

GIBBS, R. J. Effect of Natural Organic Coatings on the Coagulation of Particles. **Environment Science & Technology**, v.17, n 4, p. 237-240, 1983.

GIBBS, R. J. Estuarine flocs: their size, settling velocity and density. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C2, p. 3249-3251, 1985.

JAY, D. A.; MUSIAK, J. D.. Particle trapping in estuarine tidal flows, **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n.C10, p. 20445-20461, 1994.

KRANCK, K. Flocculation of suspended sediment in the sea. **Nature**, v, 246, n. 12, p.348-350, 1973.

KRANCK, K. The role of flocculation in the filtering of particulate matter in estuaries. In: Kennedy, V. S. (Ed). **The estuary as a filter**. New York, Academic Press, p. 159-175, 1984.

KRONE, R. B. Aggregation of suspended particle in estuaries. In: Kjerfve, B. (Ed.) **Estuarine transport processes**. Columbia, USC-Press, pp. 177-190, 1978.

LAU, Y. L.; DROPPA, I. G.; KRISHNAPPAN, B. G. Sequential erosion/deposition experiments – demonstrating the effects of depositional history on sediment erosion. **Water research**, v, 35, n. 11, p. 2767-2773, 2001.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

MILIOLI, Geraldo. **Abordagem ecossistêmica para a mineração: uma perspectiva comparativa para Brasil e Canadá.** 1999. 410 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

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.

MIRANDA, L. B. et al. **Princípios de oceanografia física de estuários.** São Paulo, Edusp, 2002. 414p.

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.

PFEIFFER, A. *In situ* measurements of flocculated suspended matter with a video multi sensor system. **Journal of Sea Research**, v. 36, n. ½, p. 115-118, 1996.

POSTMA, H. Sediment transport e sedimentation in the estuarine environment. In: LAUFF, G. H. (Ed). **Estuaries.** Washington, AAAS Publication 83, p. 158-179, 1967.

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, 1997. v.1.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Social, Urbano e Meio Ambiente - SDS. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. **Relatório Parcial**, 2004.

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.

SCHUBEL, J. R.; CARTER, H. H. The estuary as a filter for fine-grained suspended sediment. In: Kennedy, V. S. (Ed). **The estuary as a filter.** New York, Academic Press, p. 81-105, 1984.

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.

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.

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, 50, pg-pg.

WINTERWERP, J. C. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. **Continental Shelf Research**. v. 22, p. 1339-1360, 2002.

WINTERWERP, Johan C; KESTEREN Walther G. M. van. **Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marina Environment**. Amsterdam: Elsevier, 2004, 466 p.

## ANEXO 1

*revista* GEOCIÊNCIAS

Ofc. geoc 18/2009

Rio Claro (SP), 18 de julho de 2009

*Sra. Mariana A.A. Couceiro*  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prezada Pesquisadora:

Informamos que o artigo "ESTUDO DO EFEITO DA DRENAGEM ÁCIDA DA ATIVIDADE DE MINERAÇÃO DE CARVÃO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DO SEDIMENTO EM SUSPENSÃO DO ESTUÁRIO DO RIO ARARANGUÁ, SC", de autoria de Mariana A.A. Couceiro & Carlos A.F. Schettini foi submetido para avaliação pelo corpo consultivo da revista Geociências.

*Cabe ressaltar que este documento, de forma alguma, certifica a certeza de uma futura publicação do artigo.*

*Atenciosamente*

*Fábio Braz Machado*  
Editor Adjunto - Revista Geociências

**Revista Geociências**  
eISSN 1980 - 900X  
pISSN 0101 - 9082

Departamento de Petrologia e Metalogenia/Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Universidade Estadual Paulista/Câmpus de Rio Claro  
Avenida 24-A, n° 1515 CEP 13506-900 RIO CLARO, SP  
(019) 3526-2832 / 3526 2843 Fax (019) 3524-9644  
<http://www.revistageociencias.com.br>

This title is  
now indexed  
in Scopus

refine your research  
SCOPUS