

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**UTILIZAÇÃO DE VELOCÍMETRO ACÚSTICO
DOPPLER (ADV) PARA AVALIAÇÃO DA
CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM
SUSPENSÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Helenesio Carlos Borges Cabral

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

**UTILIZAÇÃO DE VELOCÍMETRO ACÚSTICO
DOPPLER (ADV) PARA AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO
DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO**

Helenesio Carlos Borges Cabral

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Daniela Guzzon Sanagiotto

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

Cabral, Helenesio Carlos Borges
UTILIZAÇÃO DE VELOCÍMETRO ACÚSTICO DOPPLER (ADV) PARA
AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO /
Helenesio Carlos Borges Cabral.-2014.

99 p.; 30cm

Orientadora: Daniela Guzzon Sanagiotto
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2014

1. Granulometria 2. Relação sinal/ruído 3. Sedimentos
I. Guzzon Sanagiotto, Daniela II. Título.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da
Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Helenesio Carlos Borges Cabral.

A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a
citação da fonte.

Endereço: Avenida João Neves da Fontoura, nº 1855, apto 103, Bairro Fátima,
Cachoeira do Sul, RS. CEP: 96508-204

Fone (0xx51) 99682687 / (0xx55) 99682629; E-mail: helenesio@yahoo.com.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado**

**UTILIZAÇÃO DE VELOCÍMETRO ACÚSTICO DOPPLER (ADV)
PARA AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM
SUSPENSÃO**

elaborada por
Helenesio Carlos Borges Cabral

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Daniela Guzzon Sanagiotto, Dr^a.
(Presidente/Orientadora)

Daniel Gustavo Allasia Picilli, Dr. (UFSM)

Nilza Maria dos Reis Castro, Dr^a. (UFRGS)

Santa Maria, 10 de outubro de 2014.

Aos meus pais Luiz Antonio Cabral e Regina Borges Cabral.

Dedico.

A minha esposa Camila Ines Ribeiro Cabral pelo companheirismo.

Ofereço.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, ao nosso grande Pai Celestial, pois sem a fé e força d'Ele seria impossível concluir objetivo algum.

Aos meus pais, Luiz Antônio Cabral e Regina Borges Cabral que me deram todas as condições necessárias para que estudasse, incentivando-me em todos os momentos, pois creio que a educação é a maior herança que os pais podem deixar aos seus filhos. Nela está a base de tudo. A todos os meus familiares e, de forma especial, a minha esposa Camila Ines Ribeiro Cabral, que sempre me incentivou em todos os momentos, onde palavras não são suficientes pra descrever minha gratidão e profundo amor!

Ao projeto MAPLU, financiado pelo FINEP e ao CNPq pela bolsa concedida para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao amigo Gabriel Herbrith Froemming.

Ao meu padrinho Julio César Vaz Pereira (in memoriam) que sempre incentivou meus pais a investirem em nossas formações, pois um dos desejos dele era ver meu irmão e eu formados.

Aos amigos do Grupo de Oração Jovem São Pedro da catedral de Santa Maria, especialmente ao Vinícius Manfio.

Deixo também registrada a minha gratidão à Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, que na qualidade de educação, além de complementar minha vida profissional, me proporcionou um curso de mestrado gratuito e de qualidade. Aos meus professores, que na função de educadores, deixo o meu reconhecimento e agradecimento pelos ensinamentos e cobranças, também quero agradecer a secretaria do curso, Marília Goulart, além de uma pessoa amiga, esta sempre nos ajudando e auxiliando no dia a dia.

Aos colegas e amigos dos grupos Gerhi, Ghidros e do DESA, pelos ótimos momentos de convívio com muita alegria e o inevitável chimarrão.

À minha orientadora e professora Daniela Guzzon Sanagiotto pelo seu apoio, amizade, compreensão e seus ensinamentos, ao professor Ivanor e aos professores da comissão examinadora por suas respectivas contribuições.

Na impossibilidade de mencionar as demais pessoas e que de alguma forma ou de outra contribuíram, deixo aqui registrado o meu muito obrigado, de coração!

“Competência é fazer o certo quando ninguém está olhando.”

(Henry Ford)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

UTILIZAÇÃO DE VELOCÍMETRO ACÚSTICO DOPPLER (ADV) PARA AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

Autor: HELENESIO CARLOS BORGES CABRAL

Orientadora: DANIELA GUZZON SANAGIOTTO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 10 de outubro de 2014.

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a possibilidade do uso do Velocímetro Acústico Doppler (ADV) para quantificar a concentração de sedimento em suspensão (CSS). Para isso foi desenvolvido um experimento em laboratório, onde se buscou em um ambiente controlado, testar a resposta do ADV para testes conduzidos em amostras de características conhecidas. Foram utilizadas oito concentrações e cinco faixas granulométricas de cinco tipos de solo de três cidades nos ensaios. Foi construído um aparato experimental, a fim de obter dados em amostras homogêneas de água e solo utilizando o programa Sontek Horizon ADV. Coletou-se as amostras em diferentes posições a 6 cm, 12 cm e a 18 cm do fundo do recipiente, totalizando mais de 600 ensaios. Para visualização dos dados e pós processamento utilizou-se o programa Win ADV aplicando o filtro (PSTM) a fim de eliminar os dados que foram afetados por algum efeito de ruído, mantendo um grande percentual de dados.

Os dados coletados mostraram o aumento do SNR em relação ao aumento da CSS para os diferentes tipos de solos para as cinco granulometrias, sendo que as melhores correlações entre o eco e a CSS ocorreram para os ensaios com os solos 2, 3 e 4.

Através das medições com o ADV em laboratório, foi possível investigar a relação sinal/ruído para diferentes faixas granulométricas e CSS de solo quando em suspensão em água. Notou-se que os valores encontrados para o SNR não seguiram uma regra determinada em relação à faixa granulométrica do solo. Ou seja, não se pode concluir que o aumento da faixa granulométrica indica o aumento do SNR, já que os valores de SNR encontrados foram maiores para algumas granulometrias em algumas concentrações e menores em outras concentrações. Já no que diz respeito às diferentes CSS, em geral, quanto maior a concentração de sedimentos, maior é o valor de SNR encontrado. Esse resultado vem ao encontro com o que tem sido visto na literatura.

Palavras chave: Granulometria. Relação sinal/ruído. Sedimentos.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduation Program in Civil Engineering
Universidade Federal de Santa Maria

USING ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV) FOR EVALUATING SUSPENDED SEDIMENTS CONCENTRATION

Author: HELENESIO CARLOS BORGES CABRAL
Advisora: DANIELA GUZZON SANAGIOTTO
Defense Place and Date: Santa Maria, October 10, 2014.

The main objective of this work was evaluating the possibility of using the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) to quantify the suspended sediment concentration (SSC). For this purpose, a laboratory experiment was developed, where a controlled environment was sought to test the ADV response for tests conducted in samples with known characteristics. Eight concentrations and five particles sizes of five types from soil types of three cities were used in the test. An experimental apparatus was built in order to obtain data in homogeneous water and soil samples utilizing the Sontek Horizon ADV software. Samples were collected in six different positions, 6cm, 12cm and 18cm from the bottom of the vessel, totalizing more than 600 sampling. The software Win ADV was utilized to visualize the data and the post processing, applying the PSTM filter to eliminate data that were affected by noise effects, maintaining a large percentage of data.

The collected data showed an increase of SNR compared to the increase of SSC for the different soil types for the five particle sizes, wherein the best correlations between echo and SSC occurred for the tests with soils 2,3 and 4.

By the measurements with ADV in laboratory, was possible to investigate the relation signal/noise for different particle sizes and SSC of soil when soil is suspended in water. It was noted that the found SNR values did not follow a pattern in relation to soil particle size. In other words, it cannot be concluded that the increase of particle size results in increase of SNR, whereas the SNR values found were larger for some particle sizes in some concentrations and smaller in others. In relation to SSC, it is easy to note that, in general, the higher the concentration of sediments, higher is the found SNR value. This result meets with what have been seen in the literature.

Key words: Particle size. Signal-to-noise ratio. Sediments.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Velocímetro Acústico Doppler (ADV) Fonte: Fonte: Elaboração própria. . | 31 |
| Figura 2 – Esquema do princípio de funcionamento do ADV. Adaptado de Sontek (2001)..... | 32 |
| Figura 3 – Relação dos dados obtidos entre a turbidez e o eco do ADV. Fonte: CHANSON et al. (2007). | 36 |
| Figura 4 – Comparação entre a turbidez, o eco e a profundidade. Fonte: CHANSON et al. (2007)..... | 36 |
| Figura 5 – Aparato experimental: (a) Notebook utilizado para armazenar os dados coletados; (b) Fonte do ADV; (c) Sistema de recirculação; (d) ADV e (e) Recipiente para homogeneização. Fonte: Elaboração própria. | 39 |
| Figura 6 – Detalhe do sistema em funcionamento nas diferentes profundidades. Fonte: Elaboração própria..... | 40 |
| Figura 7 – Velocímetro Acústico Doppler (ADV). Fonte: Elaboração própria..... | 41 |
| Figura 8 – Diferentes quantidades de solo que correspondem a composição das misturas com concentrações de 5 mg/L a 1000 mg/L. Fonte: Elaboração própria. | 43 |
| Figura 9 – (a) Momento da coleta; (b) Registros dos dados. Fonte: Elaboração própria. | 45 |
| Figura 10 – Composição mineral dos solos utilizados. Fonte: Elaboração própria..... | 46 |
| Figura 11 – (a) Destorroamento; (b) peneiras utilizadas. Fonte: Elaboração própria.. | 47 |
| Figura 12 – Tela do Win ADV. Fonte: Elaboração própria..... | 49 |
| Figura 13 – Média dos valores de SNR no tempo de coleta de 0 a 90 s, solo 1, CSS de 50 mg/L, granulometria de 1 mm, definido na frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s com o status do carregador desligado a 12 cm do fundo do recipiente. Fonte: Elaboração própria. | 54 |
| Figura 14 – Média dos valores de SNR no tempo de coleta de 0 a 90 segundos, considerando amostras com durações de até 90 s, do solo 1, CSS de 50 mg/L, granulometria de 1 mm, definido na frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s com o status do carregador desligado a 12 cm. Fonte: Elaboração própria. | 55 |
| Figura 15 – Média dos três SNRs, solo 1, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L, tempo de homogeneização de 2 minutos com o status do carregador desligado nos diferentes intervalos de coleta para as três posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.... | 56 |
| Figura 16 – Média dos três SNRs para ensaios com diferentes períodos de homogeneização variando entre 0,5 minuto a 720 minutos, utilizando solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L na posição de 12 cm do fundo do recipiente e tempo de coleta de 30 segundos. Fonte: Elaboração própria..... | 59 |
| Figura 17 – Detalhe do volume de água no recipiente no instante inicial e redução após 12 horas de homogeneização. Fonte: Elaboração própria. | 60 |
| Figura 18 – Variação de temperatura ao longo do tempo de homogeneização para diferentes tempos de homogeneização, utilizando solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L na posição a 12 cm do fundo do recipiente e tempo de coleta de 30 segundos..... | 61 |
| Figura 19 – Média dos SNRs, com aplicação do filtro (PSTM) para o solo 1, granulometria de 1 mm, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos. | 64 |

| | | |
|------------------|--|-----------|
| Figura 20 | – Média dos SNRs, com aplicação do filtro (PSTM) para o solo 1, granulometria de 500 µm, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos. | 65 |
| Figura 21 | – Média dos SNRs, com aplicação do filtro (PSTM) para o solo 1, granulometria de 250 µm, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos. | 66 |
| Figura 22 | – Média dos SNRs, com aplicação do filtro (PSTM) para o solo 1, granulometria de 125 µm, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos. | 67 |
| Figura 23 | – Média dos SNRs, com aplicação do filtro (PSTM) para o solo 1, granulometria de 63 µm, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos. | 68 |
| Figura 24 | – Variação da média dos SNRs para diferentes CSS e faixas granulométricas, solo 1, filtrada (PSTM) para a posição a 12 cm do fundo do recipiente. | 69 |
| Figura 25 | – Variação da média dos SNRs para diferentes CSS e faixas granulométricas, filtrada (PSTM) para a posição a 12 cm do fundo do recipiente para os diferentes tipos de solos: (a) solo 2; (b) solo 3; (c) solo 4; (d) solo 5..... | 70 |
| Figura 26 | – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm), com aplicação do filtro (PSTM) na granulometria de 1 mm para os diferentes tipos de solos. . | 71 |
| Figura 27 | – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm), com aplicação do filtro (PSTM) na granulometria de 500 µm para os diferentes tipos de solos. | 72 |
| Figura 28 | – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm), com aplicação do filtro (PSTM) na granulometria de 250 µm para os diferentes tipos de solos. | 73 |
| Figura 29 | – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm), com aplicação do filtro (PSTM) na granulometria de 125 µm para os diferentes tipos de solos. | 74 |
| Figura 30 | – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm), com aplicação do filtro (PSTM) na granulometria de 63 µm para os diferentes tipos de solos. . | 75 |
| Figura 31 | – Média dos valores de SNRs com aplicação do filtro (PSTM) para as diferentes granulometrias do solo 3 e para o solo 3 integral (todas as granulometrias)..... | 76 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Tabela 1 – Descrição dos solos e composição mineral. | 46 |
| Tabela 2 – Detalhamento as aberturas e malhas das peneiras e partículas de solos retidas e passantes..... | 48 |
| Tabela 3 – Comparação dos resultados obtidos dos ensaios realizados para avaliar a interferência provocada pelo status do carregador de bateria do notebook a 6 cm do fundo do recipiente e do tempo de aquisição. | 52 |
| Tabela 4 – Interferência provocada pelo status do carregador de bateria do notebook a 12 cm do fundo do recipiente e do tempo de aquisição. | 53 |
| Tabela 5 – Análise da interferência do status do carregador de bateria do notebook a 18 cm do fundo do recipiente..... | 53 |
| Tabela 6 – Resultado dos testes para avaliar a melhor faixa de velocidade do equipamento para o solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L, frequência de amostragem de 50 Hz a 12 cm do fundo do recipiente e tempo de coleta de 30 segundos..... | 57 |
| Tabela 7 – Resultados dos testes para definir a frequência de amostragem do equipamento para o solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L, velocidade de 3 cm/s a 12 cm do fundo do recipiente e tempo de coleta de 30 segundos..... | 58 |
| Tabela 8 – Análise da capacidade de repetibilidade do experimento com tipo de solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos e coleta de 30 segundos. | 62 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Métodos de análise laboratorial..... | 26 |
| Quadro 2 – Condições e parâmetros nas situações testadas..... | 42 |
| Quadro 3 – Cronograma dos ensaios para cada tipo e granulometria de solo..... | 44 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|---|
| ADP/ADCP | Perfilador Acústico Doppler/ Perfilador de Corrente Acústico Doppler |
| ADV | Velocímetro Acústico Doppler |
| CCR | Centro de Ciências Rurais |
| cm | Centímetro |
| cm ³ | Centímetro cúbico |
| cm/s | Centímetro por segundo |
| CNPq | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico |
| CSS | Concentração de Sedimentos em Suspensão |
| CT | Centro de Tecnologia |
| cv | Cavalo vapor |
| dB | Decibel |
| DNAEE | Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica |
| FINEP | Financiadora de Estudos e Projetos |
| GHidros | Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental |
| g/L | Grama por litro |
| h | Hora |
| Hz | Hertz |
| kg | Quilograma |
| kHz | Quilohertz |
| km | Quilômetro |
| km ² | Quilômetro quadrado |
| LASED | Laboratório de Sedimentos |
| LDV | Velocímetro Laser Doppler |
| Log | Logaritmo |
| MAPLU | Manejo de águas pluviais: monitoramento, modelagem, desenvolvimento de tecnologias de baixo impacto e de instrumentos para a gestão de águas pluviais em meio urbano. |
| ml | Mililitro |
| m/s | Metro por segundo |
| mg/L | Miligrama por litro |
| MHz | Megahertz |
| mm | Milímetro |
| min | Minuto |
| PPGEamb | Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental |
| PPGEC | Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil |
| rpm | Rotação por minuto |
| s | Segundo |
| SNR | Signal-to-noise ratio |
| UFSM | Universidade Federal de Santa Maria |
| T °C | Temperatura – Celsius |
| WMO | World Meteorological Organization |
| µm | Mícron |

LISTA DE APÊNDICES

| | |
|--|----|
| Apêndice A – Média dos três SNRs, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s, solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L, tempo de homogeneização de 2 minutos e com o status do carregador ligado nos diferentes intervalos de coleta para as três posições: (a) 6 cm, (b) 12 cm e (c) 18 cm do fundo do recipiente. | 88 |
| Apêndice B – Média do SNR filtrada (PSTM), solo 2 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente. | 89 |
| Apêndice C – Média do SNR filtrada (PSTM), solo 3 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente. | 90 |
| Apêndice D – Média do SNR filtrada (PSTM), solo 4 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente. | 91 |
| Apêndice E – Média do SNR filtrada (PSTM), solo 5 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente. | 92 |
| Apêndice F – Média da granulometria do solo 1, filtrada (PSTM) para as duas posições respectivamente: (a) de 6 cm, (b) a 18 cm do fundo do recipiente. | 93 |
| Apêndice G – Média do SNR não filtrado, solo 1 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente. | 94 |
| Apêndice H – Média do SNR não filtrado, solo 2 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente. | 95 |
| Apêndice I – Média do SNR não filtrado, solo 3 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente. | 96 |
| Apêndice J – Média do SNR não filtrado, solo 4 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente. | 97 |
| Apêndice K – Média do SNR não filtrado, solo 5 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente. | 98 |
| Apêndice L – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm) não filtrado nos diferentes tipos de solos para as diferentes granulometrias. | 99 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA | 16 |
| 2. OBJETIVOS | 19 |
| 2.1. Objetivo Geral | 19 |
| 2.2. Objetivos Específicos..... | 19 |
| 3. HIPÓTESE DO TRABALHO | 20 |
| 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 4.1. Processo de erosão | 21 |
| 4.2. Estudo dos sedimentos | 23 |
| 4.3. Métodos de avaliação de sedimentos..... | 25 |
| 4.3.1 Métodos de avaliação de sedimentos em suspensão | 26 |
| 4.3.1.1 Métodos convencionais..... | 26 |
| 4.3.1.2 Métodos alternativos..... | 29 |
| 4.4. Velocímetro Acústico Doppler (ADV) | 30 |
| 4.5. Utilização do ADV para estimativa da CSS | 34 |
| 5. METODOLOGIA | 38 |
| 5.1. Instalação Experimental | 38 |
| 5.1.1. Aparato Experimental..... | 38 |
| 5.1.2. Equipamento utilizado – ADV | 40 |
| 5.2. Testes preliminares..... | 41 |
| 5.3. Metodologia experimental em laboratório..... | 42 |
| 5.4. Metodologia de análise | 48 |
| 5.5. Validação dos parâmetros..... | 49 |
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 51 |
| 6.1. Testes iniciais de definição de parâmetros e condições de ensaios..... | 51 |
| 6.1.1. Influência do status do carregador..... | 51 |
| 6.1.2. Tempo de aquisição dos dados | 54 |
| 6.1.3. Faixa de velocidade | 57 |
| 6.1.4. Frequência de amostragem | 58 |
| 6.1.5. Tempo de mistura | 59 |
| 6.1.6. Avaliação da repetibilidade dos ensaios..... | 61 |
| 6.1.7. Parâmetros e condições dos ensaios definidos nos testes preliminares..... | 63 |
| 6.2. Análises das CSS x SNR..... | 63 |
| 7. CONCLUSÃO | 77 |
| 8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 79 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 80 |
| APÊNDICES | 87 |

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A erosão do solo constitui um dos processos naturais que mais degradam o meio ambiente. Dentre os vários impactos causados pela erosão tem-se: destruição das nascentes dos rios, aumento do risco de desertificação, remoção da camada fértil do solo em zonas agrícolas.

A produção de sedimentos compreende os processos de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos. A desagregação diz respeito ao desprendimento de partículas sólidas do meio de que fazem parte, devido principalmente ao impacto das gotas de chuva, além de outros fatores, tais como: reações químicas, flutuação de temperatura e ações mecânicas. O material erodido ficará exposto à ação do vento ou do escoamento superficial ou mesmo à ação de outras chuvas, disponível para ser transportado. O impacto das gotas de chuva é, após a ação do homem, o fator que mais contribui para a erosão.

Os vários tipos de problemas causados pelos sedimentos como assoreamento de reservatórios, portos, canais de irrigação, mudança da seção do rio e diminuição da qualidade da água dependem da quantidade e natureza dos mesmos, fatores estes que são dependentes dos processos de produção, transporte e deposição (PAIVA et al., 1995).

A concentração de sedimentos em equilíbrio no escoamento superficial é denominada capacidade de transporte de sedimentos, que se processa nos cursos d'água, sendo que a maior quantidade ocorre na época chuvosa, chegando a valores entre 70 e 90% de todo o sedimento transportado pelos cursos d'água neste período, principalmente durante as fortes precipitações (CARVALHO, 1994, p. 55). Parte dos sedimentos transportados fica em suspensão, outra é transportada por arraste e outra ainda deposita-se no fundo do rio.

Conforme Paiva et al. (2000), o conhecimento do aporte de sedimentos em bacias hidrográficas é extremamente importante no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Tais informações são fundamentais no dimensionamento e operação de obras hidráulicas, interferindo decisivamente nos custos de implantação e manutenção de tais sistemas.

De acordo com Molinas et al. (2001) dados reais e completos obtidos de medições de sedimentos são muito limitados, devido às dificuldades na realização de tais medições, sendo que, na sua maioria, os dados provém de medições realizadas em calhas de laboratório. Estes mesmos autores desenvolveram um trabalho de aplicação de equações para o cálculo do

transporte de sedimentos em grandes rios, usando o conceito de potência da corrente em medições de campo.

Muitas vezes não é possível realizar medidas de vazão e coletas de sedimentos em dia de chuva devido ao perigo da perda do equipamento (molinete) e porque nesses dias normalmente descem rio abaixo troncos de árvores, galhos, estacas de madeira, entre outros materiais que podem representar um risco aos técnicos de hidrometria e aos equipamentos.

Segundo Landers (2010), a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) pode ser obtida por diversos métodos diretos e indiretos. Hoje em dia, são utilizados método óptico (turbidímetros), equipamentos ultra-sônicos, velocímetros Doppler, para estimar a CSS através de relações entre uma variável medida pelo equipamento e a CSS. O método direto é através de coletas de amostras de água e posteriores análise em laboratório. Porém este método apresenta maiores custos, além de demandar maior logística e, portanto, tem sido pouco utilizado. Já o método óptico que por um lado apresenta a grande vantagem de obter medições contínuas de CSS (TERABE et al., 2005) e também fornecer séries temporais em uma posição fixa, por outro, tem como desvantagem o fato de o próprio sensor perturbar a estrutura da turbulência e como consequência perturbar também a distribuição dos sólidos em suspensão.

O Velocímetro Acústico Doppler (ADV) é um equipamento que mede a velocidade das partículas presentes na água através do princípio do efeito Doppler, utilizando transdutores acústicos receptores e transmissores. O transmissor gera um pequeno pulso de som de frequência conhecida, que se propaga na água ao longo do eixo deste feixe. Como o pulso passa pelo volume de medição, a energia acústica é refletida em todas as direções pelas pequenas partículas presentes na água. Parte da energia refletida volta através do eixo receptor, onde é feita a medição da mudança da frequência pelo ADV. O deslocamento das partículas na frequência medida pelo receptor é proporcional à velocidade das partículas. Outra variável medida pelo equipamento é a SNR (“signal-to-noise ratio”), que representa a relação sinal-ruído. Esta relação é medida em decibel (dB) e corresponde à diferença entre o nível do sinal recebido e o nível de ruído inerente ao processo de transmissão da informação. (SANAGIOTTO, 2007).

As características do equipamento e das medições realizadas com seu uso têm sido objeto de algumas pesquisas, que visam extrair informações além dos valores de velocidades médias ou instantâneas. Essas informações referem-se à avaliação da turbulência do escoamento e a estimativa da CSS. Na literatura encontramos alguns trabalhos que buscam avaliar a possibilidade do uso do ADV para outros fins, como a correlação do eco com a

turbidez medidos pelo equipamento (CHANSON, et al., 2007) e a avaliação da macroturbulência do escoamento ao longo de um canal (SANAGIOTTO, 2007). Além das medições de velocidade, vislumbram-se boas perspectivas para o uso do equipamento para avaliações de turbulência do escoamento e para a estimativa da CSS.

Segundo Pinto et al. (2013), o ADV apresenta como vantagens a baixa diferença na vazão medida em comparação ao molinete hidrométrico (inferior a 2%), o pouco tempo gasto para a medição em campo, sem falar em tempo de cálculo de vazões em escritório, já que esses dados são fornecidos imediatamente pelo ADV.

No entanto, alguns autores mencionam as limitações e incertezas da utilização do ADV para estes fins, o que indica a necessidade da continuidade de pesquisas nesse sentido. Dentre essas limitações e incertezas podemos citar o erro de, em média, 1% dos valores médios de tensão de Reynolds e velocidade em relação ao método empírico para escoamento em canais com superfície livre (VOULGARIS e TROWBRIDG, 1998), o alto custo de aquisição do ADV (PINTO et al., 2013) e o fato de a turbulência de pequena escala ser uma das fontes de ruído não reproduzida, o que não resolve completamente o problema da eliminação do ruído do sinal, provocando diferenças nas avaliações de turbulência (NIKORA e GORING, 1998).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a possibilidade do uso do ADV para quantificar a CSS.

2.2. Objetivos Específicos

Para o atendimento do objetivo geral, alguns objetivos específicos são delimitados:

1 – Construir um aparato experimental que permita a homogeneização de diferentes misturas (água e solo), com granulometrias e concentrações variadas, e permita a realização de medições com o ADV;

2 – Definir parâmetros de ensaio com o ADV no aparato experimental (faixa de velocidade, frequência de amostragem, tempo de mistura e de aquisição dos dados, influência do status do carregador da bateria do notebook ligado) e nos procedimentos laboratoriais e avaliar a repetibilidade dos ensaios;

3 – Realizar medições com o ADV em laboratório investigando a relação sinal/ruído (SNR) para diferentes faixas granulométricas, tipos de materiais em suspensão e concentrações.

4 – Verificar uma possível correlação entre as CSS com as medições realizadas com o ADV.

3. HIPÓTESE DO TRABALHO

Como as medições com o ADV estão relacionadas com a presença de partículas em suspensão e o sinal medido é afetado pela quantidade de partículas, considera-se que é possível utilizar o ADV para quantificar diferentes CSS.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas informações como o processo de erosão, estudos dos sedimentos, métodos diretos e indiretos de avaliação de sedimentos em suspensão, como coletas, ADP/ADCP e o ADV na estimativa da CSS.

4.1. Processo de erosão

O processo inicial da sedimentação, que representa a origem dos problemas provenientes dos sedimentos no meio ambiente é a erosão, ou seja, a separação e a remoção das partículas das rochas e dos solos devido à ação das águas e dos ventos, entre outros. (CARVALHO, 2008).

Segundo Maier (2013), “a erosão tem sido um problema não apenas em relação a perda de solo e a diminuição da capacidade produtiva dos solos, mas também no que se refere a aspectos de transferência desses sedimentos para os corpos d’água”.

Ainda que se busque a conservação dos solos e recursos hídricos através de práticas agrícolas, as principais fontes fornecedoras de sedimentos são as lavouras (MAIER, 2013). O solo descoberto nas lavouras, estradas e áreas de mineração potencializam o efeito da erosão pois a chuva e o vento agem diretamente sobre o solo nú, enquanto que se o solo estiver coberto, estará mais protegido deste impacto. Estes processos naturais sempre ocorreram através dos tempos geológicos, sendo responsáveis pela forma atual da superfície da terra e que abrangem o procedimento de produção do sedimento. (PAIVA, 2001; PEREIRA, 2010).

De acordo com Carvalho (2008), como a erosão é responsável por danos em terras agricultáveis, bem como em outras áreas de interesse imediato, e pelos efeitos indiretos de assoreamento de rios e lagos, seu estudo é muito importante sobre os aspectos econômicos e sociais.

Pela erosão o material terroso ou rochoso é desgastado, desagregado e removido de algum lugar do solo, o que o altera lenta e continuamente considerando-se grandes intervalos de tempo geológico (SIMÕES e COIADO, 2003).

Pode-se descrever a erosão como desgaste e afrouxamento de material rochoso e consequente remoção das partículas através dos processos atuantes no solo (BIGARELLA, 2003). Os sedimentos erodidos degradam a estrutura do solo e reduzem sua fertilidade pelo fato de que removem sua matéria orgânica, além de contribuir para a eutrofização de reservatórios e riachos por carrear nutrientes, em especial fósforo. Além disso, por absorver pesticidas, eles são agentes catalisadores, diminuindo a qualidade da água da superfície (ELLIOT e WARD, 1995).

As consequências obtidas pelo intenso uso do solo e de recursos naturais em geral, tem alertado os gestores e a comunidade científica sobre a importância de estudos e pesquisas nas áreas referentes ao transporte e a deposição de sedimentos nas bacias hidrográficas. Consequentemente, a produção de sedimentos é objeto de preocupação em todas as situações referentes à gestão do uso do solo e da água.

Em rios que drenam áreas elevadas e trechos de cabeceira os sedimentos transportados pela corrente são provenientes principalmente da erosão da superfície da bacia contribuinte, apresentando granulometria fina, e são transportados predominantemente em suspensão (PARANHOS, 2003).

Os principais fatores que afetam a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica são:

- Precipitação (quantidade, intensidade e frequência);
- Tipo de solo e formação geológica;
- Cobertura do solo;
- Uso do solo;
- Topografia;
- Natureza da rede de drenagem (densidade, declividade, forma, tamanho e conformação de canais);
- Escoamento superficial;

A quantidade de material transportado ou depositado num rio depende de uma série de condições divididas em dois grupos de variáveis (SIMONS e SENTÜRK, 1976). No primeiro grupo estão as variáveis que influenciam na quantidade e na qualidade do sedimento transportado. No segundo grupo estão as variáveis que influenciam na capacidade do rio de transportar aquele sedimento.

4.2. Estudo dos sedimentos

De forma a verificar a eficiência das medidas de controle, o estudo da sedimentologia fluvial tem se tornado cada dia mais importante na solução de problemas como assoreamento de reservatórios, mudança da seção do rio e diminuição da qualidade da água.

Define-se “produção de sedimentos” como a quantidade de sedimentos que é removida para fora de uma bacia hidrográfica ou de uma área considerada. A produção de sedimentos representa uma parcela do total de solo que foi erodido e mobilizado em um bacia em decorrência de todos os processos erosivos atuantes. A produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica refere-se à diferença entre a erosão bruta e a quantidade de sedimentos que não foi removida da bacia hidrográfica. (MINELLA, 2007, p. 5).

Conforme Paiva et al. (2000), o conhecimento do aporte de sedimentos em bacias hidrográficas é extremamente importante no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Tais informações são fundamentais no dimensionamento e operação de obras hidráulicas, interferindo decisivamente nos custos de implantação e manutenção de tais sistemas.

O transporte sólido nos cursos de água pode ser feito, basicamente, de duas formas:

- suspensão na massa líquida;
- arrastamento no fundo.

Os sedimentos transportados junto à superfície do solo movem-se por rolagem, arraste ou quicando e são constituídos de partículas, cujo movimento é altamente dependente da capacidade de transporte. Uma redução na capacidade de transporte causa a imediata deposição dessas partículas. Já os sedimentos em suspensão, os quais estão uniformemente distribuídos na lâmina de água escoada superficialmente, não são depositados imediatamente devido à redução na capacidade de transporte. Esse retardamento é resultado da pequena velocidade de sedimentação das partículas em suspensão (GRAF, 1971; BORDAS e SEMMELMANN, 1993).

No transporte em suspensão, as partículas sólidas são transportadas pelas componentes horizontais das velocidades do fluxo turbulento e suportadas pelas componentes verticais destas velocidades, sem contato com o leito do curso d'água. Essas partículas formam a carga sólida em suspensão. A maior parte da descarga sólida é representada, segundo Carvalho (2000), pelo sedimento em suspensão, chegando a representar 95% da descarga sólida total.

Diversos estudos, como por exemplo Carvalho (2008), descrevem que o transporte de sedimentos depende de diversos fatores como o tamanho, a forma e o peso do sedimento e as forças exercidas pela ação de escoamento. Outros fatores que também podem influenciar no

transporte dos sedimentos são: a quantidade e intensidade das chuvas, a topografia, a formação geológica do terreno, a cobertura, tipo e uso do solo.

De acordo com NAGLE et al. (1999), enquanto as partículas mais finas são transportadas em suspensão na coluna d'água, os sedimentos de maior granulometria costumam movimentar-se como carga de fundo em corpos hídricos.

Os corpos hídricos são capazes de transportar uma quantidade máxima de sedimentos, o que chamamos de valor de saturação. Este valor depende de vários fatores, como a declividade do curso d'água, a vazão, a granulometria, o tipo e o peso específico dos sedimentos. Quando a quantidade de sedimentos transportados for superior a capacidade ao ponto de saturação, há uma tendência ao assoreamento (rios, lagos, canais e reservatórios). Já quando o valor é menor, ou seja, quando ocorre insaturação, há uma probabilidade de incidência de processo erosivo nas margens e leitos dos corpos hídricos. (CARVALHO, 2008; MULLER, 1995).

Conforme McCully (2001), embora existam inúmeras pesquisas, não é possível estimar com precisão a quantidade de sedimentos que é transportada pelos rios, já que a medição do material sólido carregado por um curso d'água normalmente é mais dispendiosa e complexa que a medida de vazão.

No transporte por arrastamento, as partículas sólidas rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água, praticamente não perdendo contato com o leito deste. Essas partículas formam a carga sólida de arrasto (CARVALHO, 1993).

As partículas sólidas sofrem a influência de várias forças atuantes, o que torna muito complicada a análise da capacidade e da forma do transporte de sedimentos. Os sedimentos que alcançam os cursos d'água se apresentam com diversas granulometrias e sofrerão diversos processos de transporte, correspondente com as condições do local e escoamento (CARVALHO, 1994).

Conforme descrito por Tucci (1998), a capacidade de transporte refere-se à quantidade máxima de sólido que um escoamento à superfície livre pode transportar. Não deve ser confundida com a competência do escoamento, a qual designa o maior tamanho das partículas sólidas que esse pode carregar.

Existem duas maneiras de se avaliar o transporte de sedimentos nos leitos fluviais (BRANCO, 1998):

1. Através do uso de fórmulas empíricas de transporte de sedimentos, onde se relaciona a carga sólida com parâmetros do fluido e do material transportado.

2. Através de medições diretas de vazão líquida e concentração de sedimentos numa seção de medida no curso d'água. Esta medição deve ser feita periodicamente e durante um determinado intervalo de tempo que seja de caráter representativo.

4.3. Métodos de avaliação de sedimentos

O avanço tecnológico tem permitido o projeto de novos equipamentos, tanto para medidas diretas quanto indiretas. Alguns métodos, como o da filtração, da evaporação e do tubo de retirada pelo fundo, medem diretamente apenas a carga em suspensão, obtendo daí a descarga total de sedimento de fundo. Já outros métodos estimam apenas a carga de sedimentos de fundo, como por exemplo o peneiramento, densímetro, pipetagem e tubo de retirada pelo fundo (DNAEE, 1970). Outros ainda são usados para medir a quantidade de sedimentos transportados de maneira indireta, levando em conta as características do material amostrado no leito do rio, fazendo uso de parâmetros hidráulicos da corrente na seção do rio considerada para estas medições.

Segundo Orwin et al. (2005), o estudo e as medições das concentrações de sedimentos em suspensão são utilizados em uma ampla gama de disciplinas para estabelecer impactos dos diferentes processos naturais e da atividade humana.

Conforme Carvalho (2008) há três processos de análises diferentes para a determinação da concentração total de sedimentos em suspensão, sendo eles o método da descarga sólida em suspensão, descarga sólida de arrasto e descarga sólida total, dependendo da coleta de amostragem da concentração de sedimentos.

No quadro 1 são apresentadas as análises mais usuais de concentração de sedimentos e de granulometrias descrita por DNAEE (1970).

| | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Amostras de sedimentos em suspensão | Análise de concentração total | Método de filtração |
| | | Método de evaporação |
| | | Método do tubo de retirada pelo fundo |
| | Análise granulométrica | Tubo de retirada pelo fundo |
| | | Pipetagem |
| | | Densímetro |
| Amostras de material do fundo | Análise granulométrica | Peneiramento |
| | | Densímetro |
| | | Pipetagem |
| | | Tubo de acumulação visual |
| | | Tubo de retirada pelo fundo |

Quadro 1 – Métodos de análise laboratorial. Fonte: DNAEE, 1970.

4.3.1 Métodos de avaliação de sedimentos em suspensão

4.3.1.1 Métodos convencionais

Uma estação sedimentométrica é uma seção no curso d'água para medições de descarga sólida, que deve ser instalada, preferencialmente, junto à estação fluviométrica. Conforme Carvalho (1994), os equipamentos para a amostragem de sedimentos, mistura (água e sedimento) para medição indireta da descarga em suspensão, podem ser classificados em três categorias: amostradores instantâneos, amostradores por bombeamento e amostradores por integração.

Amostradores instantâneos: Realizam a coleta de um determinado volume (água e sedimento) em um ponto específico através do fechamento instantâneo, por meio de dispositivos localizado nas extremidades do recipiente.

Amostradores por bombeamento: Retiram a mistura água e sedimento através de um orifício pela ação de bombeamento, podendo ser succionada através de um tubo ou mangueira que é colocada no ponto de amostragem. Alguns dispositivos de entrada são colocados fixos, em posição de aproximadamente a 90° com o fluxo da água, desta forma evitando a entrada de folhas e outros possíveis objetos. Em uma mesma vertical vários amostradores podem ser

montados, para realizar coletas em diversos níveis. Esse equipamento consiste em uma peça com orifício e um sistema de bombeamento que coleta uma amostra representativa, colocando-a num coletor ou num conjunto de garrafas para análise posterior ou medida imediata. Apesar deste amostrador coletar sedimento em um ponto, também pode ser usado para amostragem quase contínua em um sistema automático. Podem ser pontuais ou integradores na vertical.

Amostradores por integração: Acumulam no recipiente a mistura água e sedimento em certo tempo pela retirada do fluxo ambiente através de um pequeno bico ou bocal. Podendo ser pontuais ou integradores na vertical. Esses amostradores são preferidos porque obtém uma mistura (água e sedimento) em um tempo adequado, para ser considerada uma amostra representativa.

Os amostradores do tipo integrador são os mais utilizados, coletando uma amostra durante certo intervalo de tempo, sendo de dois tipos integradores pontuais e integradores na vertical. O amostrador pontual admite a amostra num ponto selecionado de determinada vertical de seção transversal do curso d'água. Já o amostrador por integração na vertical admite a amostra enquanto é movido em velocidade uniforme na vertical do curso d'água.

Os amostradores ou medidores de sedimento em suspensão, de maneira geral, são instantâneos ou integradores, podendo ser classificados em diferentes tipos, como garrafa, saca, bombeamento, nuclear, ultra-sônico, ultra-sônico de dispersão, eletrônico, fotoelétrico, tubo comum na vertical, instantâneo horizontal, instantâneo vertical e integrador. Entre os amostradores citados para amostragem de sedimento, o mais simples é o amostrador que usa garrafa, podendo ser uma garrafa de leite, uma jarra para suco ou qualquer outro recipiente que possa ser usado para descida ao ponto de amostragem (CARVALHO, 2003). É necessário ter o cuidado para evitar o indesejável borbulhamento que é produzido na entrada, quando o ar da garrafa é expulso com a admissão da amostra, podendo ser evitado com a colocação de um respiro.

A seguir são apresentados alguns dos principais amostradores de sedimentos utilizados (PARANHOS, 2003):

➤ Amostrador ISCO, portátil, por bombeamento, automático e programável para amostra líquida. Este equipamento funciona com energia elétrica e coleta as amostras por intervalo de tempo ou por vazão, armazenando-as em frascos para posterior análise. Os dados ficam guardados na memória para serem transferidos para o computador ou impressora. As amostras são conservadas a 4 °C por um refrigerador acoplado. Possui capacidade de sucção de 7,5 metros de coluna d'água.

- Amostrador US-DH-59, também conhecido como AMS-3, é integrador na vertical. Utilizado para profundidades de até 5 metros, sua velocidade pode atingir até 1,5 m/s.
- Amostrador US-U-59, amostrador de estágio único, integrador, instalado em níveis predeterminados, num suporte vertical que pode ser o pilar da ponte.
- Amostrador US-DH-48, também conhecido como AMS-1, é integrador na vertical para profundidades de até 1,5 metros, para coleta de amostra em suspensão.
- Amostrador US-DH-43 é integrador, utilizado para profundidades de até 5 metros e velocidade de até 2 m/s, possui o mesmo sistema de funcionamento que o AMS-3.

Os amostradores de sedimento em suspensão, independentemente do método de sua amostragem, podem ser classificados pela orientação de seus orifícios em dois tipos, em orifícios contra a corrente e paralelos ao escoamento e orifícios orientados em ângulo reto ao escoamento (amostradores de bombeamento para operação fixa, equipamentos fixos registradores e instantâneos verticais).

Devido ao fato de todo esse processo ser trabalhoso e possuir um alto custo, como por exemplo gastos com equipe técnica qualificada e deslocamento, além dos custos para análise em laboratório busca-se outras formas de medições indiretas como a utilização de turbidímetros, ADCP/ADP, Velocímetro Acústico Doppler (ADV), entre outros.

Segundo Barti et al., (1973) apud Bassi (1990), a turbidez indica a resistência da água à passagem da luz, causada pela presença de material suspenso. Em estudos realizados no Ribeirão do Feijão - SP, correlacionando a turbidez com a concentração de sedimentos, Geraldes (1984) apud Bassi (1990), concluiu que a intensidade do sinal diminui com o aumento do tamanho da partícula. Devido a este fato o autor sugeriu que este método deva ser utilizado em bacias onde predominem partículas de silte e argila. Pavanelli et al., (2002) num estudo realizado na Itália lembram que análises de concentração de sedimentos com grande frequência são onerosas, sugerindo a turbidez como alternativa para a avaliação da produção de sedimentos. Os autores recomendam, porém, que se deve tomar cuidado no uso desta metodologia, pois a turbidez é muito sensível a variações da granulometria e da composição do material em suspensão. Portanto, a turbidez não pode substituir a concentração de sedimentos sem uma análise cuidadosa da relação entre ambas, na bacia em estudo.

Entretanto o uso do turbidímetro para estimar a CSS apresenta algumas limitações que devem ser superadas para que os dados coletados sejam consistentes e confiáveis. As informações adquiridas por um sensor de turbidez, por ser instalado em uma posição fixa em

uma seção de medição, não consideram a variação natural da turbidez que ocorre em uma seção hidrométrica. Outro aspecto é a limitação do sensor de turbidez de registrar o sinal de sedimentos correspondentes a fração areia e também necessita de limpeza frequentemente das lentes do sensor de turbidez para remover a presença de impurezas que ficam retidas na lente do sensor de leitura, obstruindo o sinal da turbidez. Essa limpeza pode ocorrer de maneira simples, quando são acoplados dispositivos automáticos de limpeza.

A utilização do sensor de turbidez não substitui a necessidade de amostragens de sedimentos realizadas manualmente, pois o procedimento padrão para determinar a CSS, definido internacionalmente pelo World Meteorological Organization (WMO), consiste na amostragem manual, conforme procedimentos descritos por WMO (2003). Segundo essa publicação a turbidez não é uma medida direta de CSS, dependendo da elaboração de uma curva de ajuste entre o sinal de turbidez e da CSS, que deve ser necessariamente determinado *in situ*, através dos métodos manuais definidos pela WMO (2003).

4.3.1.2 Métodos alternativos

Existem métodos alternativos que vem sendo utilizados em pesquisas para medição da concentração de sedimentos em suspensão como o ADCP/ADP (Acoustic Doppler Current Profiler/Acoustic Doppler Profile) e o ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) que são conhecidos no meio hidrológico. Esses equipamentos são utilizados para medir as velocidades das partículas presentes na água em diferentes profundidades. Conforme Gamaro (2006), o ADCP/ADP permite determinar as áreas das seções transversais de rios, através do somatório dos perfis de corrente obtidos em tempo real, resultando nas vazões escoadas.

O ADP emite um sinal sonoro através de sensores (transdutores) que é refletido pelas partículas em suspensão existentes na água, que são movimentadas pela corrente, o que permite a estimativa da velocidade através da recepção de pulsos sonoros pelos mesmos sensores. A velocidade dos alvos e, conseqüentemente, a velocidade da própria corrente é proporcional à diferença entre a frequência do sinal refletido pelos alvos em movimento. (KOSTASCHUK et al., 2005; BENSI, 2006; DORNELLES, 2009).

De acordo com Dornelles (2009) e Kostaschuk et al. (2005), o ADP pode ser utilizado ainda na determinação da CSS a partir da intensidade do retroespalhamento (ecos). Após cada medição de vazão líquida as informações dos ecos gravadas no equipamento poderiam ser

relacionadas a uma medição de CSS executada antes ou depois da descarga líquida, podendo-se assim obter-se as descargas líquidas e sólidas praticamente no mesmo intervalo de tempo.

Schuck (2013) trabalhou com ADP com várias CSS, coletando amostras em dois pontos verticais em laboratório. Através deste trabalho a autora concluiu que houve aumento no retorno acústico do ADP, o que está associado ao aumento da CSS no reservatório. Ainda foi possível observar que as metodologias aplicadas ao eco medido pelo ADP podem ser utilizadas para estimar a CSS em reservatório experimental, porém vinculadas a estudos adicionais. A autora também observou que existe uma relação direta com a CSS e o eco, já que os resultados do trabalho apresentaram uma boa correlação entre eco e turbidez.

Ainda segundo Schuck (2013), “o monitoramento contínuo de uma estação fluviométrica, permitirá a construção de curvas chave que relacionem o eco com a turbidez e a CSS, válida para esta estação”. A autora acredita que os dados apresentados neste trabalho somam-se aos estudos voltados a relacionar a CSS com as medições feitas com o ADP, ainda que estes dados não permitam generalizar um comportamento para estimativa de CSS.

Gamaro et al., 2009, realizaram um estudo do uso de medidores acústicos Doppler de velocidades estático e móvel, denominados Argonaut SL, modelo de 1500 KHz, com alcance máximo de 20 metros e um ADCP Rio Grande, de 600 KHz para avaliar sedimentos em suspensão em rios, para verificar a possibilidade de monitorar sedimentos em suspensão em um curso d'água, através da relação entre a força do sinal desses medidores. Esse estudo comprovou que se pode ter um controle contínuo de sedimentos através de um aparelho acústico estático, semelhante à utilização com turbidímetros, com a vantagem de se usar uma análise em uma faixa condizente com a frequência do Argonaut SL utilizado ao invés de se ter uma medição pontual.

4.4. Velocímetro Acústico Doppler (ADV)

O Velocímetro Acústico Doppler, ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), é um equipamento para medição da velocidade da água nas três componentes (x, y e z) de forma indireta, por meio da medição da velocidade do movimento das partículas presentes na água, através do efeito Doppler utilizando transdutores acústicos, receptores e transmissores (Figura 1).



Figura 1 – Velocímetro Acústico Doppler (ADV) Fonte: Elaboração própria.

O transmissor gera um pequeno pulso de som de frequência conhecida, que se propaga na água ao longo do eixo deste feixe. Como o pulso passa pelo volume de medição, a energia acústica é refletida em todas as direções pelas pequenas partículas presentes na água. Parte da energia refletida volta através do eixo receptor, onde é feita a medição da mudança da frequência pelo ADV. Este deslocamento na frequência medido pelo receptor é proporcional à velocidade das partículas.

A variável medida pelo equipamento é a SNR (signal-to-noise ratio), que representa a relação sinal-ruído. Esta relação é medida em decibel (dB), e corresponde à diferença entre o nível do sinal recebido e o nível de ruído inerente ao processo de transmissão da informação. O SNR indica se há quantidade suficiente de partículas suspensas na água, pois se a quantidade de partículas existentes na água for pequena, o sinal de retorno das partículas pode ser inferior ao ruído eletrônico do ambiente. Quanto maior for o SNR, maior será a concentração de partículas, resultando em melhor qualidade de medições. Na figura 2 é ilustrado esquematicamente o processo de funcionamento deste equipamento.

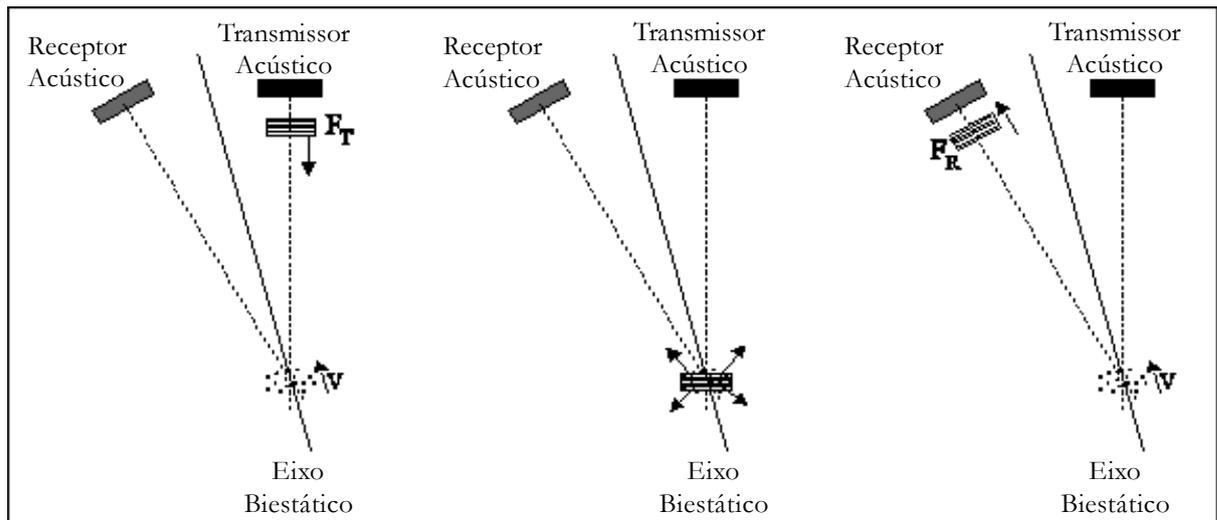


Figura 2 – Esquema do princípio de funcionamento do ADV. Adaptado de Sontek (2001).

Obs: F_T é a frequência transmitida (da fonte) e F_R é a frequência recebida, dada por $F_R = F_{\text{fonte}} + F_{\text{Doppler}}$

Segundo Lohrmann et al, (1994) foram realizadas várias comparações de características estatísticas como espectros de potência, desvio padrão e média afim de verificar a facilidade de instalação do ADV e a possibilidade de operação em diferentes fluxos, conseguindo-se resultados de valores de velocidade semelhantes aos obtidos com outros medidores como por exemplo o LDV.

Outra variável medida pelo equipamento é a SNR (“signal-to-noise ratio”), que representa a relação sinal-ruído. Esta relação é medida em decibel (dB), e corresponde à diferença entre o nível do sinal recebido e o nível de ruído inerente ao processo de transmissão da informação. Essas características do equipamento e das medições realizadas com seu uso tem sido objeto de algumas pesquisas, que visam extrair informações além dos valores de velocidades médias ou instantâneas.

Segundo Lohrmann et al. (1994), nem sempre é possível prever as magnitudes do ruído antes da realização das medições, porque sempre há um grau de incerteza em relação às condições “reais” do escoamento.

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

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

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

Segundo Sontek (2001), o sinal pode ser prejudicado pela existência de turbulência elevada e aeração no escoamento, sendo que, nesses casos, recomenda-se a aplicação de um filtro às séries de dados, a fim de se eliminar as perturbações causadas pelas condições prejudiciais.

Alguns filtros são bastante simples e consistem em retirar da série de dados os que apresentam determinados valores de SNR ou correlação, que se encontram fora das faixas recomendadas pelos fabricantes. Outros filtros são mais elaborados e têm sido bastante utilizados pelos usuários de ADV. Um exemplo é o filtro chamado de “*Phase-Space Thresholding Method*” – PSTM, desenvolvido por Goring e Nikora (2002), utilizado para detectar os “*spikes*” que segundo Sanagiotto (2007) são dados da série de valores medidos que sobre-saem dos demais) nas séries de velocidades obtidas com o ADV. Neste método, os pontos são graficados de tal maneira que as variáveis e derivadas destas são confrontados entre si. Após podem ser traçadas envoltórias, que delimitam os dados que podem ser aproveitados dos dados que representam ruído.

Sanagiotto (2007) utilizou o filtro PSTM e pode observar que com o uso desses filtros é possível retirar os “*spikes*” da série de dados mantendo um grande percentual (até mais de 80%) de dados na amostra. Com a aplicação deste filtro consegue-se reduzir em aproximadamente 20% os valores de energia cinética e da turbulência, e em média em 15% a tensão de Reynolds no plano xy, em relação aos resultados obtidos sem o filtro. Porém ainda não se pode afirmar que todos os efeitos do ruído sejam reduzidos com o uso do filtro.

4.5. Utilização do ADV para estimativa da CSS

Pelas características do ADV e pelo princípio de funcionamento do mesmo, pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de obter outras informações a partir do uso do ADV, para estimativas de concentração de sedimentos em suspensão.

Ha et al. (2009) em seu experimento de laboratório, para estimar a CSS, utilizaram três ADVs, sendo um de 5 MHz definido na frequência de amostragem de 10 Hz e velocidade de 5 cm/s, outro de 10 MHz e o último, um Micro ADV, de 16 MHz definidos na velocidade de 3 cm/s, taxa de amostragem de 5 Hz e tempo de aquisição definido em 60 segundos. As CSS utilizadas variaram de 7,5 mg/L até 2 g/L. A partir deste trabalho foi possível concluir que um ADV pode ser um instrumento útil para estimar a CSS, embora sua principal função seja medir velocidades de fluxo em um ponto fixo. Segundo os autores para converter com precisão a potência do sinal recebido em CSS, as seguintes questões devem ser abordadas: (1) um condicionador de sinal de ADV parece ter pelo menos duas relações de amplificação selecionadas automaticamente para permitir que os sinais amplificados encaixem-se a uma gama pré-selecionada; (2) o sinal de dispersão refletido do ADV teria muito ruído para enfrentar as mudanças instantâneas da CSS devido à alta amplificação da definição do equipamento e volume de amostragem pequena. Assim, de acordo com esses pesquisadores, para ter melhores respostas ao usar o ADV para medir a CSS para sedimentos coesivos, se possível, deve-se selecionar um equipamento com o comprimento de onda que esteja próximo do tamanho das partículas de sedimentos.

Outros trabalhos conduzidos com o objetivo de associar medições obtidas com o ADV para a CSS têm sido realizados. Entre eles pode-se citar: Brown e Chanson (2013), Xavier et al. (2012) e Chanson (2007).

Brown e Chanson (2013) colocaram um ADV em um ambiente urbano durante uma grande enchente no rio Brisbane em janeiro de 2011 no leste da Austrália durante dois dias e investigaram a relação entre a amplitude de retroespalhamento do equipamento com a concentração de sedimentos em suspensão, caracterizando o fluxo em suspensão. Chegaram a conclusão que a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão mostrou uma tendência geral com o aumento da CSS no momento que diminuía o nível da água.

Xavier et al. (2012) utilizaram um ADV de 6 MHz para medir a CSS em sedimentos não coesivos, com granulometria maior que 60 μm . Os ensaios realizados em seu experimento seguiram os procedimentos clássicos (Guenec et al. (2010)): o ADV foi

submerso em um em um tanque cilíndrico de acrílico com 40 cm de diâmetro e 50 cm de altura, preenchido com água doce filtrada, no qual foi sendo inserido gradualmente quantidades de sedimentos com granulometria conhecida, de forma a aumentar a concentração. A faixa granulométrica utilizada foi de 60 μm a 90 μm , classificados como areia fina. As profundidades adotadas para as medições foram de 12 cm e 20 cm do fundo. As CSS utilizadas foram divididas em sete categorias (0,005 g/L, 0,01 g/L, 0,025 g/L, 0,05 g/L, 0,10 g/L, 0,25 g/L e 0,5 g/L). Duas bombas para aquário (mod. B650 fabricadas pela Sarlo Better), foram utilizadas para promover uma circulação do fluido e manter a solução o mais homogênea possível durante os ensaios. Os valores médios de SNR obtidos foram de 26,52 dB e 34,88 dB. Para a concentração de 10 mg/L o SNR médio para as profundidades de 12 e 20 cm foi, respectivamente, de 40,87 dB e 40,24 dB. Já para a concentração de 250 mg/L os SNR foram de 52,02 dB e 51,49 dB para as alturas, respectivamente, de 12 cm e 20 cm. Verificou-se uma maior intensidade de sinal retroespalhado na parte mais profunda do recipiente, bem como um maior SNR médio.

A partir da relação linear entre o Log (SNR) e Log (CSS) das duas profundidades, foram obtidas as curvas de calibração, sendo as médias de SNR calculadas no intervalo de 30 segundos, correspondentes às maiores correlações. Os coeficientes das curvas de calibração são ligeiramente diferentes pelo fato da distribuição das partículas nas diferentes profundidades não ser homogênea. Esse autor para validar os resultados de seu experimento, comparou suas curvas de calibração com as obtidas por Verney, et al. (2007) em trabalho com características do sedimento, faixa de tamanho e equipamento acústico semelhante ao que ele próprio utilizou.

Obtendo diferenças de SNR para as duas profundidades nas medições para cada CSS, Xavier et al. (2012), constataram que as bombas utilizadas não geraram circulação suficiente para que as partículas de sedimento ficassem suspensas durante todo o período de coleta, concluindo que é necessário um sistema aprimorado para garantir a homogeneidade do sistema.

Chanson et al. (2007) em seu experimento buscou correlacionar a intensidade acústica de um Micro ADV (16 MHz) com a turbidez, utilizando uma sonda de turbidez instalada a 5 cm de um leito do estuário subtropical denominado Erapah Creek no leste da Austrália durante um período de 10 horas. Os resultados dessas medições são apresentados na figura 3. Observa-se que o aumento da velocidade da água acarreta diretamente no aumento do eco (dB), ou seja, quanto maior for a turbidez, maior será o ruído.

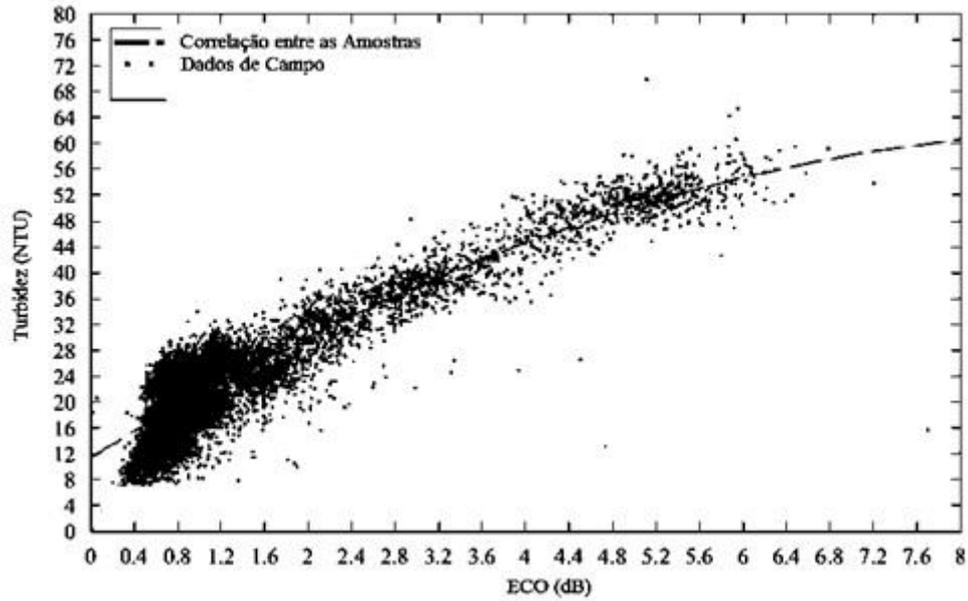


Figura 3 – Relação dos dados obtidos entre a turbidez e o eco do ADV. Fonte: CHANSON et al. (2007).

Chanson et al. (2007) também registraram dados de turbidez e eco medido com elevada CSS no mesmo período, ou seja, de 10 h, conforme mostrado na figura 4. O mesmo relatou que foi possível registrar a amplitude do sinal acústico, onde apresentou uma boa correlação com a turbidez em um período de 2 h.

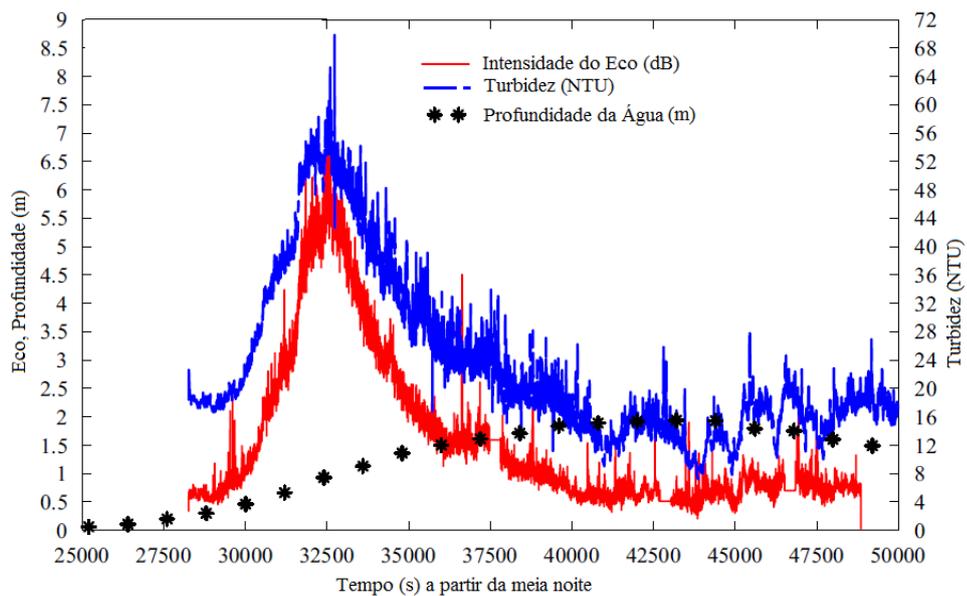


Figura 4 – Comparação entre a turbidez, o eco e a profundidade. Fonte: CHANSON et al. (2007).

Chanson et al (2007) observaram que o eco medido pelo Micro ADV foi similar as medições de turbidez e que não foram apresentadas variações nas diferentes profundidades. Portanto, recomenda-se a utilização do Micro ADV para correlacionar com as CSS, já que a turbidez tem boa correlação com a CSS.

5. METODOLOGIA

Para atender o objetivo dessa pesquisa que busca correlacionar o sinal medido com um ADV com a CSS, foram realizados ensaios em laboratório, em um ambiente controlado, testando respostas do ADV para testes conduzidos em amostras de características conhecidas. Para atender essa etapa foi construído um aparato experimental descrito a seguir, que permite a obtenção dos dados em amostras homogêneas de água e solo.

Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos adotados bem como os equipamentos e detalhes da instalação experimental, metodologia experimental e metodologia de análise para viabilizar a realização da etapa experimental.

5.1. Instalação Experimental

5.1.1. Aparato Experimental

Foi construído no Laboratório de Sedimentos (LASED) no Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, CT – UFSM, um aparato experimental composto por um recipiente cilíndrico, com altura e diâmetro de aproximadamente 30 cm e 29,5 cm respectivamente.

Neste recipiente misturou-se quantidades conhecidas de diferentes tipos e granulometrias de solos em 15 litros de água destilada. Esse aparato (Figura 5) contém um sistema de recirculação composto por uma tubulação de PVC de $\frac{3}{4}$ ", e uma bomba (modelo 70023 de 3410 RPM, $\frac{1}{2}$ CV e 60 Hz).

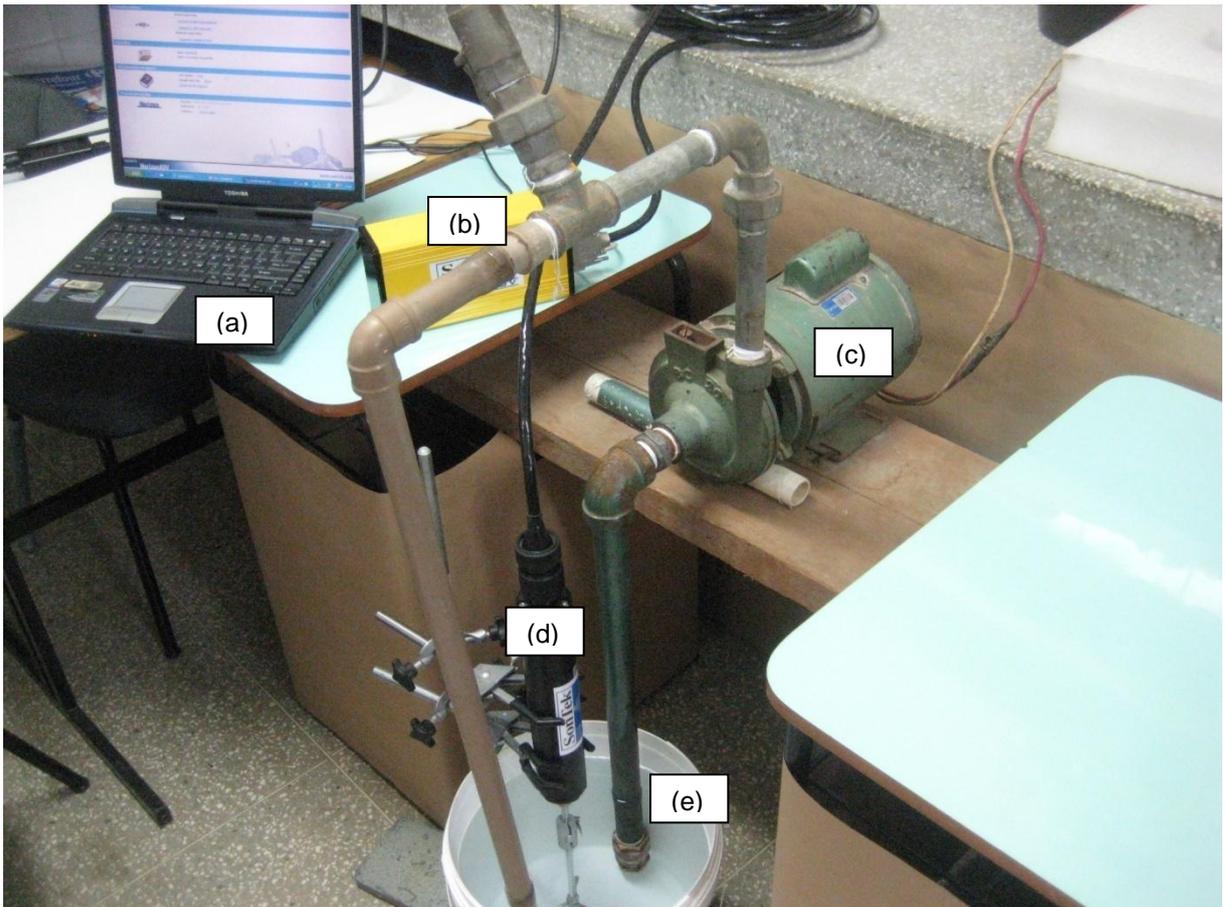


Figura 5 – Aparato experimental: (a) Notebook utilizado para armazenar os dados coletados; (b) Fonte do ADV; (c) Sistema de recirculação; (d) ADV e (e) Recipiente para homogeneização. Fonte: Elaboração própria.

O processo de recirculação buscou garantir a homogeneidade da mistura. Realizaram-se testes com o objetivo de assegurar que as misturas ficassem homogêneas, evitando qualquer deposição de sedimento no fundo do recipiente durante a realização dos experimentos.

Para o posicionamento do equipamento no interior do recipiente para a realização das medições, utilizou-se o apoio de um suporte que permitiu que o ADV fosse deslocado verticalmente, ficando fixo na posição desejada, conforme a figura 6.

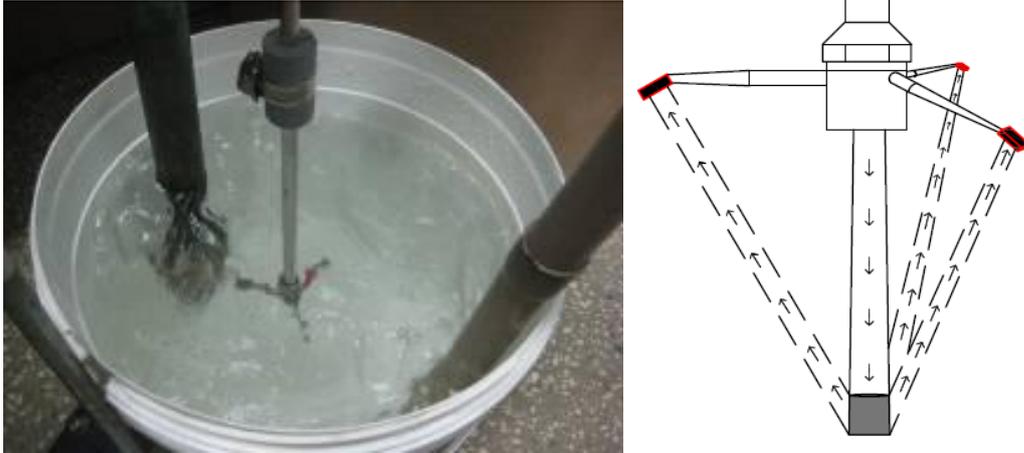


Figura 6 – Detalhe do sistema em funcionamento nas diferentes profundidades. Fonte: Elaboração própria.

5.1.2. Equipamento utilizado – ADV

O equipamento utilizado foi o Micro ADV 16 MHz Sontek/YSI (Acoustic Doppler Velocimeter), conforme é ilustrado na figura 7. Este equipamento é ideal para realizar trabalhos em laboratório, pois possui características como medições da velocidade em três eixos, altas taxas de amostragem de até 50 Hz, faixa de amostragem no volume total de água de 1 cm³, alta precisão (1% da faixa de medição), resolução de 0,01 cm/s e ampla faixa de velocidade (3 cm/s até 250 cm/s). O ADV durante sua fabricação já é calibrado, dispensando a realização de aferições periódicas, ao menos que ocorra algum dano físico.



Figura 7 – Velocímetro Acústico Doppler (ADV). Fonte: Elaboração própria.

Este equipamento realiza as medições de velocidade em um volume localizado a aproximadamente 5 cm da sonda emissora, com valores das três componentes cartesianas e com faixas de velocidades ajustadas em 3 cm/s, 10 cm/s, 30 cm/s, 100 cm/s e 250 cm/s e amostragens também ajustadas em diferentes frequências de 0,1 Hz, 10 Hz, 25 Hz e ou 50 Hz.

5.2. Testes preliminares

Ao início das atividades experimentais, percebeu-se que há uma série de condições de ensaios e parâmetros do equipamento que deviam ser definidos. Dessa forma, foram testadas cada uma das condições ou parâmetros individualmente, buscando verificar quais são os mais adequados dentro do objetivo desse trabalho.

As condições e parâmetros testados são os apresentados no quadro 2.

| Condição / Parâmetro | Situação testada |
|--|--------------------------------|
| Faixa de velocidade | 3, 10, 30, 100 e 250 cm/s |
| Frequência de amostragem | 0,1, 10, 25 e 50 Hz |
| Tempo de mistura | De 30 segundos até 720 minutos |
| Tempo de aquisição dos dados | De 0 até 90 segundos |
| Influência do status do carregador do notebook | Ligado / Desligado |
| Repetibilidade | 10 ensaios |

Quadro 2 – Condições e parâmetros nas situações testadas. Fonte: Elaboração própria.

5.3. Metodologia experimental em laboratório

No laboratório, verificou-se a possibilidade do uso do ADV para quantificar a concentração de sedimentos em suspensão. Para tanto foi necessário realizar algumas medições com oito concentrações, cinco tipos de solos e três profundidades conhecidas no recipiente.

Foram definidos como parâmetros de configuração do equipamento para os ensaios a frequência de 50 Hz, o tempo de aquisição de dados de 30 segundos e a faixa de velocidade de 3 cm/s. Esses parâmetros foram definidos em testes preliminares, cujos resultados estão apresentados no item 6.1 desse texto.

Foram realizadas medições com o equipamento em três posições dentro do recipiente: a 6 cm do fundo, onde ocorre a maior agitação da água com as partículas de sedimentos, devido a saída da bomba estar bem próxima da superfície do recipiente; a 12 cm, considerado aproximadamente a metade da coluna total de água e a 18 cm do fundo do recipiente, bem próximo da superfície.

Com objetivo de verificar a influência do funcionamento da bomba de circulação no momento da coleta dos dados pelo equipamento na variação do SNR, escolheu-se um tipo de solo, uma concentração e uma granulometria, para realização de ensaios com a bomba desligada e ligada. Os ensaios foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa, ligou-se a bomba deixando que homogeneizasse a mistura (água e solo) por 2 minutos, desligou-se a bomba e coletou-se três amostras, uma em cada posição do recipiente (6 cm, 12 cm e 18 cm). Na segunda etapa o procedimento foi o mesmo realizado anteriormente, porém após os 2 minutos de homogeneização, as amostras foram coletadas sem que se desligasse a bomba.

Na aquisição dos dados utilizou-se o programa Horizon ADV, recomendado pelo fabricante do equipamento. Durante a realização dos ensaios, mediu-se a temperatura da água

no início dos ensaios, informando ao programa de aquisição dos dados e após cada hora de homogeneização.

Para os testes utilizou-se oito concentrações de sedimentos conhecidas de 5 mg/L, 10 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 250 mg/L, 500 mg/L e 1000 mg/L (Figura 8) sendo realizada 3 repetições, totalizando 24 amostras para cada um dos cinco tipos de solo e 120 ensaios para todos os diferentes tipos de solos. O tempo de aquisição dos ensaios com o ADV foi definido em 30 s, totalizando 1500 dados por ponto.

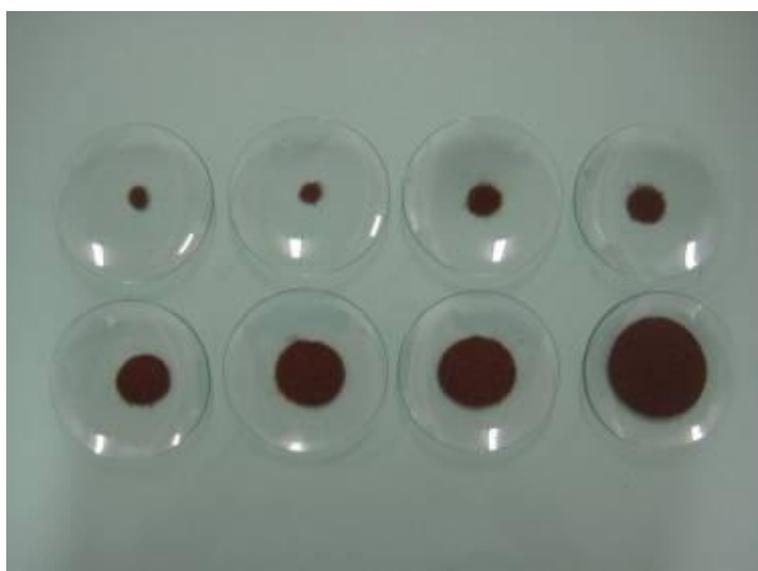


Figura 8 – Diferentes quantidades de solo que correspondem a composição das misturas com concentrações de 5 mg/L a 1000 mg/L. Fonte: Elaboração própria.

No primeiro ensaio, foram inseridos no recipiente gradualmente quantidades de sedimentos com granulometria e concentração conhecidas de um tipo de solo, respectivamente de 1 mm e de 5 mg/L e ligado o sistema de recirculação para o processo de homogeneização por um período de dois minutos – tempo esse citado por Guerrero et al. (2011 b). Após desligou-se o circuito e realizou-se as medições com o ADV na posição aproximadamente a 6 cm do fundo do recipiente, por um período de 30 segundos.

Após esta medição, acionava-se o sistema novamente, por mais dois minutos, para garantir a homogeneização da mistura solo e água, desligando e realizando a medição de concentração na posição a 12 cm do fundo do recipiente, no mesmo intervalo de tempo. E por último, ligou-se novamente o sistema para realizar o mesmo processo descrito anteriormente,

porém realizou-se as medições a 18 cm do fundo do recipiente, conforme a descrição do cronograma no quadro 3.

Para cada solo, foram realizados testes com as oito concentrações já mencionadas anteriormente e cinco faixas granulométricas (63 μm , 125 μm , 250 μm , 500 μm e 1 mm), totalizando 200 condições diferentes. Para cada condição foram realizadas medições em três posições, resultando em 600 ensaios.

| Designação | Solo | Origem | Faixas granulométricas testadas | CSS testadas (mg/L) | Posições testadas em relação ao fundo (cm) | Nº de Ensaios |
|------------|---------------------------------------|-------------|---|---------------------|--|---------------|
| 1 | Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico | Santa Maria | 63 μm 125 μm 250 μm 500 μm 1 mm | 5 | 6 12 18 | 5*5*8*3=600 |
| 2 | Argissolo Vermelho Distrófico | São Gabriel | | 10 | | |
| 3 | Cambissolo Háplico Tb Distrófico | São Gabriel | | 25 | | |
| | | | | 50 | | |
| | | | | 100 | | |
| 4 | Latossolo Vermelho Distrófico | Passo Fundo | 250 | | | |
| | | | 500 | | | |
| 5 | Planossolo Háplico Eutrófico | São Gabriel | 1000 | | | |

Quadro 3 – Cronograma dos ensaios para cada tipo e granulometria de solo. Fonte: Elaboração própria.

Para realização dos oito ensaios, foram, a partir do primeiro, inseridas gradualmente maiores quantidades de sedimentos, até completar a concentração determinada para o ensaio seguinte.

Após realizar o último ensaio com o solo 1 utilizando a CSS máxima de 1000 mg/L para a granulometria de 1 mm, que corresponde a partículas de 501 μm a 1 mm, conforme a figura 9, foi realizada a limpeza de todos os equipamentos com algodão e água destilada,

realizando o mesmo processo com o mesmo tipo de solo, porém com faixas granulométricas diferentes:

- de 500 μm , que corresponde a partículas de 251 μm a 500 μm ;
- de 250 μm , que corresponde a partículas de 126 μm a 250 μm ;
- de 125 μm que corresponde a partículas de 64 μm a 125 μm ;
- de 63 μm que corresponde a partículas menores que 63 μm .

Com objetivo de analisar se a separação por faixas granulométricas influencia nos resultados, com as mesmas configurações utilizadas nos ensaios, realizou-se um teste com o solo 3 integral, ou seja, com todas as granulometrias.

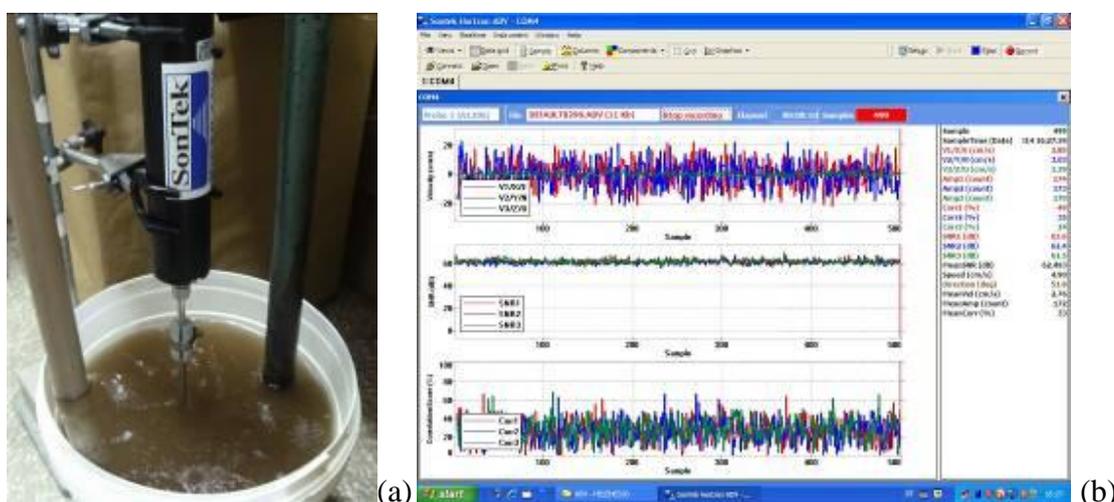


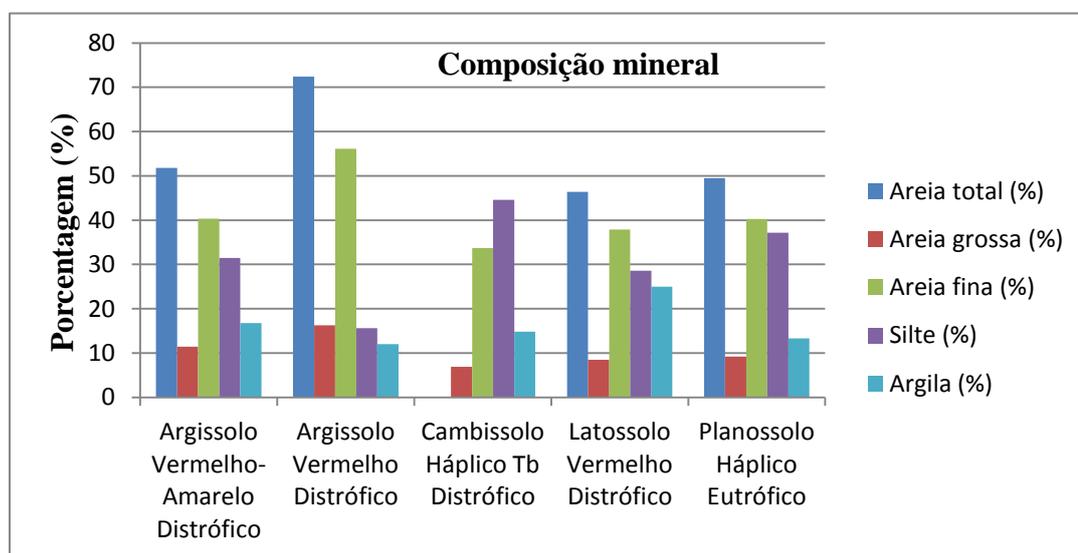
Figura 9 – (a) Momento da coleta; (b) Registros dos dados. Fonte: Elaboração própria.

Realizaram-se os oito ensaios citados anteriormente para todos os tipos de solos (1, 2, 3, 4 e 5 que corresponde a Argissolo Vermelho - Amarelo Distrófico, Argissolo Vermelho Distrófico, Cambissolo Háplico Tb Distrófico, Latossolo Vermelho Distrófico, Planossolo Háplico Eutrófico, respectivamente), fornecidos pelo Laboratório do Centro de Ciências Rurais (CCR - UFSM) coletados em diferentes profundidades, conforme a descrição (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição dos solos e composição mineral.

| Solo | Classes | Origem | Prof. (cm) | Areia total (%) | Areia grossa (%) | Areia fina (%) | Silte (%) | Argila (%) |
|------|---------------------------------------|-------------|------------|-----------------|------------------|----------------|-----------|------------|
| 1 | Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico | Santa Maria | 0-10 | 51,8 | 11,4 | 40,4 | 31,4 | 16,8 |
| 2 | Argissolo Vermelho Distrófico | São Gabriel | 10-20 | 72,4 | 16,3 | 56,1 | 15,6 | 12,0 |
| 3 | Cambissolo Háptico Tb Distrófico | São Gabriel | 0-10 | 40,6 | 6,9 | 33,7 | 44,6 | 14,8 |
| 4 | Latossolo Vermelho Distrófico | Passo Fundo | 0-10 | 46,4 | 8,5 | 37,9 | 28,6 | 25,0 |
| 5 | Planossolo Háptico Eutrófico | São Gabriel | 10-20 | 49,5 | 9,2 | 40,3 | 37,2 | 13,3 |

A determinação da granulometria foi feita por peneiras e pelo método da pipeta descrito em EMBRAPA (2006). Na figura 10 pode ser visualizada a composição de cada amostra.

**Figura 10** – Composição mineral dos solos utilizados. Fonte: Elaboração própria.

Para realizar os ensaios, as granulometrias dos solos foram separadas em diferentes faixas, conforme as recomendações da NBR 7181/1984, após a amostra ser seca ao ar livre ou em estufa a 100 °C por 24 horas. Neste processo todos os solos foram secos ao ar livre e

destorroados (Figura 11). Após este processo foi inserido 1 kg de cada tipo de solo com suas diferentes granulometrias nas peneiras com as malhas passantes de 1 mm, 500 μm , 250 μm , 125 μm e 63 μm e agitados manualmente por aproximadamente 15 minutos. Este tempo de agitação deve-se ao fato de que alguns solos apresentaram mais coesão estrutural, ou seja, a fração argilosa do solo estava em forma de torrões. Alguns solos como areais e pedregulhos, que não apresentam coesão, ao serem cortados ou escavados destorroam-se mais facilmente (Almeida, 2005).

Após este processo foram separadas as diferentes granulometrias, pesadas as porcentagens passantes em cada peneira e colocadas em sacos plásticos, identificando-os.



Figura 11 – (a) Destorroamento; (b) peneiras utilizadas. Fonte: Elaboração própria.

Os tipos de peneiras com suas numerações, aberturas, partículas de solo retidas e passantes estão detalhados na tabela 2. Utilizou-se nos ensaios as partículas de solo passantes.

Tabela 2 – Detalhamento as aberturas e malhas das peneiras e partículas de solos retidas e passantes.

| Número da peneira | Abertura da malha | Partículas de solo retidas | Partículas de solo passantes |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 18 | 1 mm | maiores que 1 mm | 501 μm a 1 mm |
| 35 | 500 μm | 501 μm a 1 mm | 251 μm a 500 μm |
| 60 | 250 μm | 251 μm a 500 μm | 126 μm a 250 μm |
| 120 | 125 μm | 126 μm a 250 μm | 64 μm a 125 μm |
| 230 | 63 μm | 64 μm a 125 μm | menores que 63 μm |

5.4. Metodologia de análise

Para a avaliação dos dados do ADV foi utilizado o filtro PSTM, desenvolvido por Goring e Nikora (2002). Esse método é chamado pelos autores de “Phase-Space Thresholding Method”. Esse filtro foi modificado e implementado no programa WinADV por Wahl (2003).

Segundo Sanagiotto (2007) no método PSTM os pontos são plotados de tal maneira que as variáveis e derivadas destes são confrontados entre si, considerando-se que os dados seguem os limites de uma distribuição aleatória normal, com desvio padrão e média igual a zero.

O WinADV é um programa desenvolvido por Tony Wahl, utilizado para a visualização e pós processamento de dados que são obtidos através do uso do ADV, estando disponível ao público desde 1996 (WAHL 2003). Desde sua primeira versão, utilizada inicialmente no Laboratório de Pesquisas em Recursos Hídricos do Bureau of Reclamation, esse programa vem sendo implementado em conjunto com a Son Tek Inc.

Em uma discussão sobre o trabalho de Goring e Nikora (2002), Wahl (2003) apresenta certas alterações no PSTM. O autor, então, implementou este método no programa Win ADV.

Na figura 12 é apresentada uma tela do software WinADV em um pós processamento dos dados do ADV.

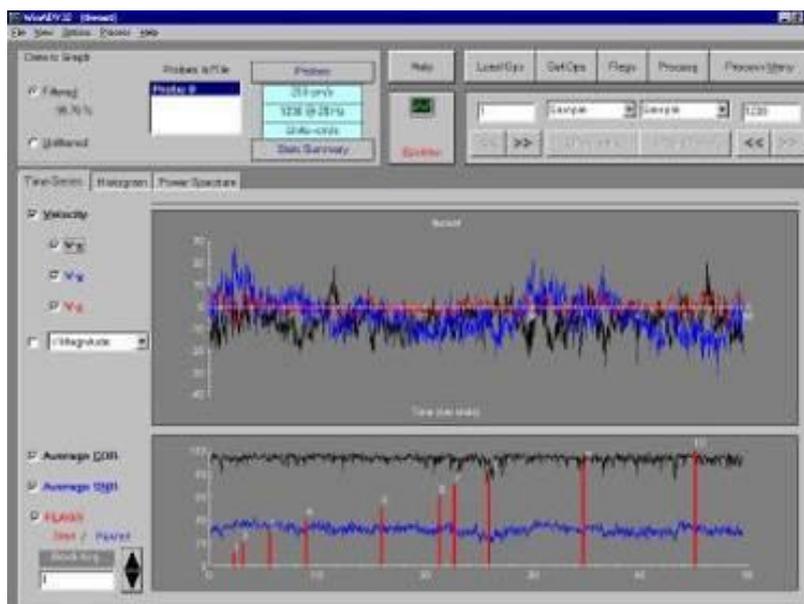


Figura 12 – Tela do Win ADV. Fonte: Elaboração própria.

Com a aplicação do filtro nos dados obtidos pelo ADV, tentou-se eliminar dados afetados por algum efeito de ruído (ruído elétrico, ruído proveniente da presença de bolhas na água, entre outros) e manter um grande percentual de dados.

5.5. Validação dos parâmetros

Em algumas análises, buscou-se uma ferramenta estatística que permitisse avaliar se existe uma diferença significativa entre dois ou mais valores. Para essa avaliação foi utilizado o teste t de Student, com nível de significância de 5%, através do programa Primer, que permitiu verificar se as grandezas podiam ser consideradas iguais ou não dentro de um certo nível de significância.

Foi aplicado o teste t com o objetivo de avaliar qual a melhor faixa de velocidade do equipamento, melhor frequência e melhor tempo de homogeneização e de aquisição dos dados para que se pudesse definir os valores destes parâmetros a serem utilizados nos ensaios. Além disso foram analisadas através deste teste a interferência provocada pela energia elétrica nas diferentes posições no momento das coletas e a capacidade de repetibilidade do experimento.

Para a definição dos parâmetros velocidade e frequência do equipamento, foram realizados testes com as diversas configurações de velocidade e frequência de amostragem

que o equipamento possui, com intervalos de coleta de 30 segundos. Para tanto, foi utilizada granulometria de 1 mm e concentração de sedimentos de 50 mg/L do solo 1 (Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico). O equipamento foi ajustado na frequência de amostragem de 50 Hz e inserido a 12 cm do fundo do recipiente, considerado a metade do nível da água para verificar as diferentes velocidades.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos, incluindo uma análise inicial com os testes de definição dos parâmetros e condições dos ensaios, entre eles a definição da faixa de velocidade, a frequência de amostragem, o tempo de mistura, a influência do status do carregador do notebook, a avaliação da repetibilidade dos ensaios, e os resultados e as análises dos experimentos buscando relacionar a CSS com o sinal fornecido pelo ADV, e a relação sinal/ruído ou SNR.

6.1. Testes iniciais de definição de parâmetros e condições de ensaios

Nesse item são apresentados os resultados de ensaios preliminares que foram realizados com o objetivo de definir quais as configurações e os parâmetros adequados para a execução dos demais ensaios. Em uma fase inicial, foram realizadas avaliações visualmente, na tela do programa de aquisição de dados, com a análise visual da influência das alterações dos parâmetros no sinal captado.

Foram avaliados e testados mais detalhadamente a influência da corrente elétrica na aquisição dos dados, tempo de aquisição dos dados, faixa de velocidade, frequência de amostragem, tempo de mistura e diferentes concentrações de sedimentos cujos resultados e conclusões estão na sequência.

6.1.1. Influência do status do carregador

Com o objetivo de verificar se o uso do notebook ligado à rede elétrica estava interferindo nas coletas dos ensaios, realizou-se ensaios com dezoito amostras divididas em duas etapas, com carregador de bateria conectado a rede elétrica e desconectado, nas três profundidades, com diferentes intervalos de tempo de coleta de 30 s, 60 s e 90 s, utilizando solo 1 (Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico), concentração de 50 mg/L, granulometria de

1 mm, frequência de amostragem do equipamento de 50 Hz e velocidade de 3 cm/s. Nas tabelas 3 a 5 são apresentados os valores médios dos SNRs e os desvios padrão para as profundidades de 6 cm, 12 cm e 18 cm, respectivamente, do fundo do recipiente.

Os dados obtidos foram submetidos ao teste t com objetivo de avaliar a influência do uso do carregador do notebook conectado à energia elétrica, sendo confrontadas 45 situações. Em cada uma das tabelas 3 a 5 são apresentadas 15 situações (30L-30D; 30L-60L; 30L-60D; 30L-90L; 30L-90D; 30D-60L; 30D-60D; 30D-90L; 30D-90D; 60L-60D; 60L-90L; 60L-90D; 60D-90L; 60D-90D e 90L-90D), sendo que letras iguais identificam valores que não diferem significativamente ao nível de 5% de significância e letras diferentes identificam valores que diferem significativamente a tal nível.

Tabela 3 – Comparação dos resultados obtidos dos ensaios realizados para avaliar a interferência provocada pelo status do carregador de bateria do notebook a 6 cm do fundo do recipiente e do tempo de aquisição.

| Status do carregador da bateria | Tempo (s) | Dados por ponto | Média SNRs | Média do desvio padrão SNRs |
|---------------------------------|-----------|-----------------|--------------------|-----------------------------|
| Ligado | 30 | 1500 | 50,50 ^a | 2,56 |
| Desligado | 30 | 1500 | 50,37 ^a | 2,67 |
| Ligado | 60 | 1500 | 49,10 ^b | 2,65 |
| Desligado | 60 | 1500 | 48,80 ^c | 3,02 |
| Ligado | 90 | 1500 | 48,34 ^d | 2,66 |
| Desligado | 90 | 1500 | 47,91 ^e | 3,06 |

*Letras iguais não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância de 5%.

Observa-se na posição a 6 cm de profundidade do fundo do recipiente no intervalo de tempo de 30 segundos, comparando o status do carregador ligado e desligado, não houve diferença significativa. Já nos intervalos de tempos de 60 s e 90 s, os resultados apresentaram diferença significativa.

Na tabela 4 são apresentados os valores da média e do desvio padrão dos SNRs, comparando a interferência provocada pela energia elétrica na posição a 12 cm de profundidade do fundo do recipiente em diferentes intervalos de tempo.

Tabela 4 – Interferência provocada pelo status do carregador de bateria do notebook a 12 cm do fundo do recipiente e do tempo de aquisição.

| Status do carregador da bateria | Tempo (s) | Dados por ponto | Média SNRs | Média do desvio padrão SNRs |
|---------------------------------|-----------|-----------------|--------------------|-----------------------------|
| Ligado | 30 | 1500 | 53,32 ^a | 2,69 |
| Desligado | 30 | 1500 | 54,02 ^b | 2,60 |
| Ligado | 60 | 1500 | 51,73 ^c | 2,96 |
| Desligado | 60 | 1500 | 52,61 ^d | 2,95 |
| Ligado | 90 | 1500 | 50,85 ^e | 2,95 |
| Desligado | 90 | 1500 | 51,95 ^f | 3,00 |

*Letras iguais não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância de 5%.

Em todos os intervalos de tempo, os resultados obtidos com o status do carregador ligado e desligado apresentaram diferença significativa em nível de 5% de significância.

Na tabela 5 são apresentadas as análises da média e desvio padrão dos três SNRs nos três diferentes intervalos de tempo na posição a 18 cm do fundo do recipiente.

Tabela 5 – Análise da interferência do status do carregador de bateria do notebook a 18 cm do fundo do recipiente.

| Status do carregador da bateria | Tempo (s) | Dados por ponto | Média SNRs | Média do desvio padrão SNRs |
|---------------------------------|-----------|-----------------|--------------------|-----------------------------|
| Ligado | 30 | 1500 | 54,12 ^a | 2,80 |
| Desligado | 30 | 1500 | 53,83 ^b | 3,05 |
| Ligado | 60 | 1500 | 52,90 ^c | 2,84 |
| Desligado | 60 | 1500 | 51,93 ^d | 3,30 |
| Ligado | 90 | 1500 | 51,74 ^e | 3,12 |
| Desligado | 90 | 1500 | 50,65 ^f | 3,47 |

*Letras iguais não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância de 5%.

Na posição a 18 cm do fundo do recipiente também foi possível observar que houve diferença significativa a nível de significância de 5% entre o status do carregador do notebook estar ligado ou desligado em todos os intervalos de tempo.

Optou-se pela realização dos ensaios com o carregador desligado, pois como pode ser observado na tabela 5, a média dos SNRs foi maior com o carregador ligado, o que quer dizer que o sinal do ruído é maior, ou seja, o carregador ligado influencia nos resultados obtidos, o que faz com que os resultados encontrados desta forma não sejam totalmente confiáveis, pois o SNR lido pelo ADV não corresponde somente ao movimento das partículas em suspensão, mas também ao ruído causado pela corrente elétrica passante pelo carregador.

6.1.2. Tempo de aquisição dos dados

Foram realizadas medições no intervalo de tempo de 0 a 90 segundos com o solo 1, com objetivo de analisar qual o melhor intervalo de tempo de aquisição de dados que deveria ser utilizado no desenvolvimento dos ensaios. Na figura 13 é apresentado o sinal da relação sinal/ruído (SNR) ao longo do tempo de aquisição de 90 segundos.

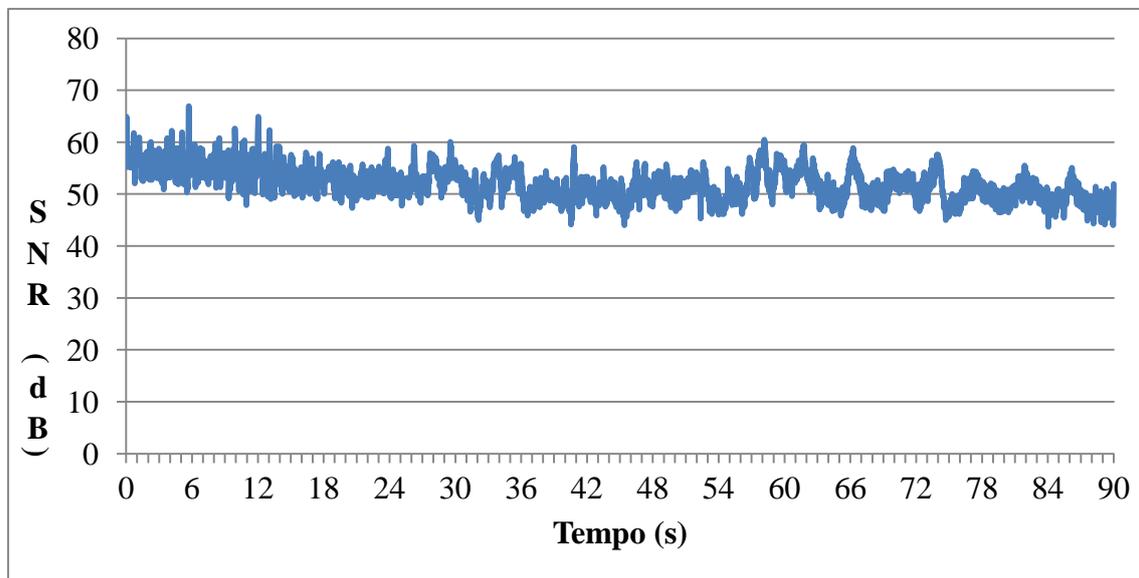


Figura 13 – Média dos valores de SNR no tempo de coleta de 0 a 90 s, solo 1, CSS de 50 mg/L, granulometria de 1 mm, definido na frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s com o status do carregador desligado a 12 cm do fundo do recipiente. Fonte: Elaboração própria.

Da amostra dos 90 segundos, foram avaliados os valores médios de SNR testando diferentes intervalos de tempo (0 a 5 s, 0 a 10 s, 0 a 15 s, 0 a 20 s, 0 a 30 s, 0 a 35 s, 0 a 40 s,

0 a 45 s, 0 a 50 s, 0 a 55 s, 0 a 60 s, 0 a 65 s, 0 a 70 s, 0 a 75 s, 0 a 80 s, 0 a 85 s e 0 a 90 s), conforme é apresentado na figura 14.

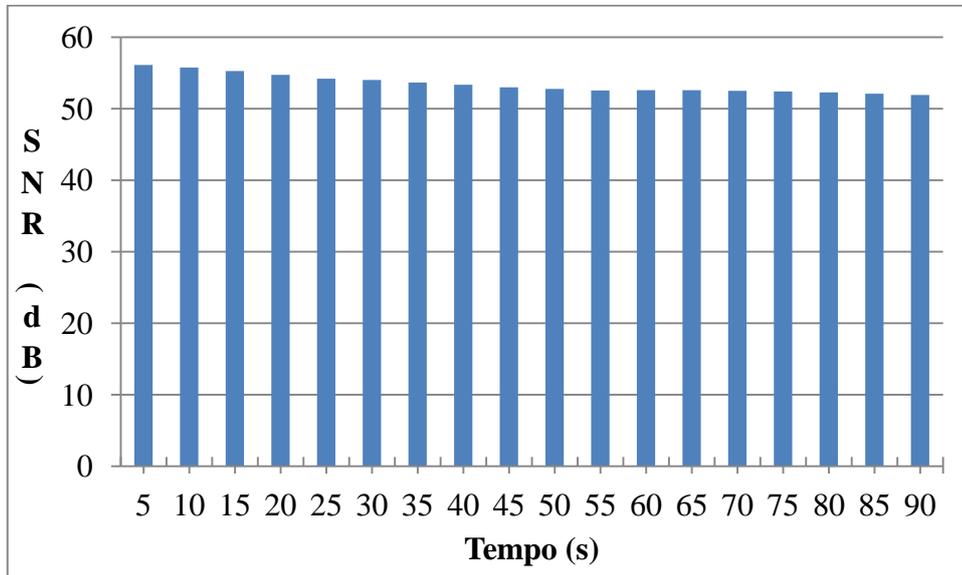


Figura 14 – Média dos valores de SNR no tempo de coleta de 0 a 90 segundos, considerando amostras com durações de até 90 s, do solo 1, CSS de 50 mg/L, granulometria de 1 mm, definido na frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s com o status do carregador desligado a 12 cm. Fonte: Elaboração própria.

Ainda utilizando a amostra de 90 segundos, foram feitos cortes no intervalo de tempo a fim de analisar o comportamento dos valores médios dos SNRs para cada subintervalo, nas posições 6 cm, 12 cm e 18 cm de profundidade do fundo do recipiente, conforme ilustrado na figura 15.

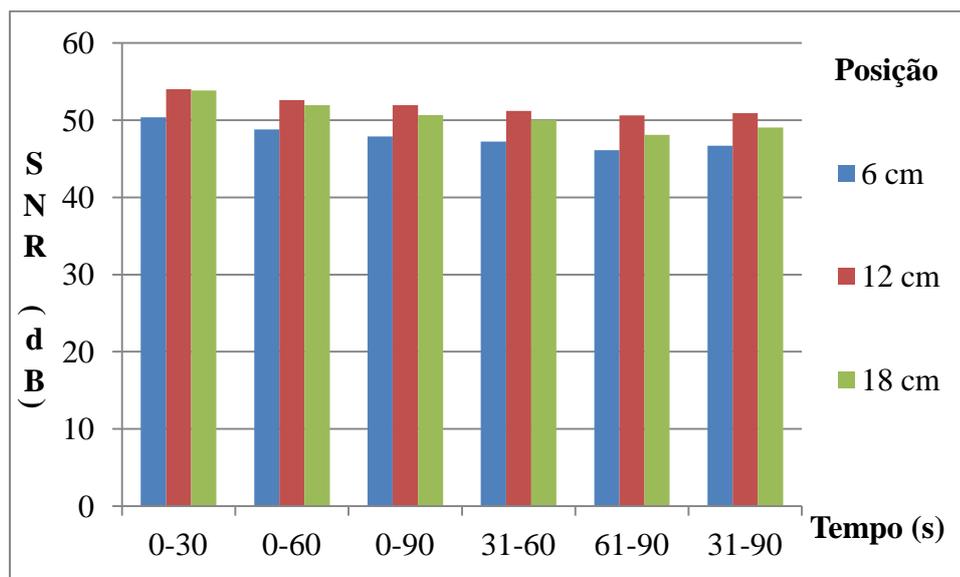


Figura 15 – Média dos três SNRs, solo 1, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L, tempo de homogeneização de 2 minutos com o status do carregador desligado nos diferentes intervalos de coleta para as três posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.

A análise das figuras 13 e 14 mostra que com o passar do tempo, o sinal sofre um decaimento, decorrente da sedimentação das partículas e deposição das mesmas no fundo do recipiente. Dessa forma, optou-se por adotar um período de análise para os experimentos de 30 segundos. Justifica-se utilizar este intervalo de tempo pelo fato de que ao aplicar o filtro PSTM, em média, 40% dos dados são eliminados, ou seja, de 1500 dados por ponto, após a aplicação do filtro restam em média 900 dados. Também, ao desligarmos a bomba, nos primeiros segundos de aquisição dos dados (em média até 3 segundos) foi possível observar algum tipo de ruído. A partir dos 30 segundos de coletas, observou-se também que a mistura estava perdendo a homogeneidade, já que as partículas de sedimentos em suspensão aos poucos foram se depositando no fundo do recipiente.

Na figura 15 é possível observar que os primeiros 30 segundos de aquisição de dados foram os que apresentaram maior média dos valores de SNR. Isto acontece pelo fato de que neste intervalo de tempo a mistura solo e água encontram-se homogênea, ou seja, as partículas de sedimentos estão em suspensão. Esta homogeneidade diminui com o passar do tempo, fazendo com que a partir de 30 segundos o SNR passe a diminuir seu valor, o que pode ser observado na média dos valores de SNR para os intervalos de 31 a 60 segundos e 61 a 90 segundos. No apêndice A podem ser visualizados os gráficos nas três posições com a mesma configuração, porém com o status do carregador do notebook conectado a rede elétrica.

6.1.3. Faixa de velocidade

Foram realizados testes com as diversas configurações de velocidade do equipamento com intervalos de coleta de 30 segundos. Para tanto, foi utilizada granulometria de 1 mm e concentração de sedimentos de 50 mg/L do solo 1. O equipamento foi ajustado na frequência de amostragem de 50 Hz e inserido a 12 cm do fundo do recipiente, considerado a metade do nível da água para testar as diferentes velocidades.

Na tabela 6 são apresentados alguns resultados de ensaios conduzidos com diferentes faixas de velocidades ajustadas no equipamento, onde buscou-se verificar qual a melhor configuração de velocidade a ser definida para os ensaios posteriores, sendo validados pelo teste t de Student determinados em nível de 5% de probabilidade de erro.

Confrontou-se 30 situações, sendo dividida em 10 situações (3-10; 3-30; 3-100; 3-250; 10-30; 10-100; 10-250; 30-100; 30-250 e 100-250) para cada SNR conforme apresentadas, sendo que letras iguais identificam valores que não diferem significativamente e letras diferentes identificam valores que diferem significativamente ao nível de 5% de significância.

Tabela 6 – Resultado dos testes para avaliar a melhor faixa de velocidade do equipamento para o solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L, frequência de amostragem de 50 Hz a 12 cm do fundo do recipiente e tempo de coleta de 30 segundos.

| Velocidades (cm/s) | Dados | Média | | | Desvio padrão | | |
|-----------------------|-------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------|-------|-------|
| | | SNR 1 | SNR 2 | SNR 3 | SNR 1 | SNR 2 | SNR 3 |
| 3 | 1500 | 47,78 ^a | 47,63 ^a | 48,31 ^a | 4,70 | 4,55 | 4,67 |
| 10 | 1500 | 46,74 ^b | 47,44 ^a | 47,77 ^b | 4,47 | 4,73 | 4,30 |
| 30 | 1500 | 47,06 ^c | 46,22 ^b | 47,62 ^{bc} | 4,47 | 4,29 | 4,32 |
| 100 | 1500 | 47,29 ^{cd} | 47,66 ^a | 47,90 ^{bd} | 4,41 | 4,28 | 4,43 |
| 250 | 1500 | 47,65 ^a | 46,93 ^c | 47,90 ^{be} | 4,57 | 4,42 | 4,17 |

*Letras iguais não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância de 5%.

Após validar as médias dos SNRs das diferentes velocidades pelo teste t de Student determinados em nível de 5% de probabilidade de erro, observou-se que a maioria das confrontações diferem significativamente. Optou-se pelo uso da faixa de velocidade de

3 cm/s, que é mais compatível com as velocidades verificadas dentro do tanque de ensaios, que em geral são bastante baixas, além de que com os mesmos parâmetros de amostragem esta faixa de velocidade foi a que retornou os maiores valores de SNR nas leituras.

6.1.4. Frequência de amostragem

Avaliou-se se a frequência de aquisição afetava os resultados, testando diferentes frequências do equipamento com o mesmo tipo de solo e mesmas condições. Foram realizadas medições ajustadas nas quatro frequências do equipamento, utilizando granulometria de 1 mm, concentrações de 50 mg/L a 12 cm do fundo do recipiente e tempo de aquisição de 30 segundos, configurando o ADV na velocidade de 3 cm/s.

Os dados obtidos foram submetidos ao teste t, com objetivo de definir a frequência a ser definida para os ensaios. Foram confrontadas 18 situações, divididas em 6 situações (1-10; 0,1-25; 0,1-50; 10-25; 10-50 e 25-50) pra cada SNR, conforme apresentado na tabela 7, onde letras iguais identificam valores que não diferem significativamente ao nível de 5% de significância e letras diferentes identificam valores que diferem significativamente a tal nível.

Tabela 7 – Resultados dos testes para definir a frequência de amostragem do equipamento para o solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L, velocidade de 3 cm/s a 12 cm do fundo do recipiente e tempo de coleta de 30 segundos.

| Frequência (Hz) | Dados | Média | | | Desvio padrão | | |
|--------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|-------|-------|
| | | SNR 1 | SNR 2 | SNR 3 | SNR 1 | SNR 2 | SNR 3 |
| 0,1 | 1500 | 48,88 ^a | 49,02 ^a | 49,59 ^a | 3,37 | 3,22 | 3,53 |
| 10 | 1500 | 50,31 ^b | 50,74 ^b | 51,60 ^b | 6,69 | 6,69 | 6,08 |
| 25 | 1500 | 46,16 ^c | 46,64 ^c | 46,42 ^c | 4,31 | 4,16 | 4,27 |
| 50 | 1500 | 47,06 ^d | 46,17 ^d | 47,67 ^d | 4,65 | 4,50 | 4,57 |

*Letras iguais não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância de 5%.

Observa-se nos diferentes ensaios que as frequências, segundo o teste t de Student com nível de significância de 5%, apresentaram diferença significativa quanto à média. Logo

optou-se pela frequência de 50 Hz para a continuidade do experimento pelo fato de assim se obter maior quantidade de dados por segundo amostrado.

6.1.5. Tempo de mistura

Foram realizados ensaios com diferentes tempos de homogeneização da água com o solo, variando entre 0,5 minuto e 720 minutos, com CSS de 50 mg/L, velocidade de 3 cm/s, frequência de amostragem de 50 Hz na posição a 12 cm do fundo do recipiente, visando verificar a influência do tempo de homogeneização nos resultados obtidos das amostras, conforme ilustrado na figura 16.

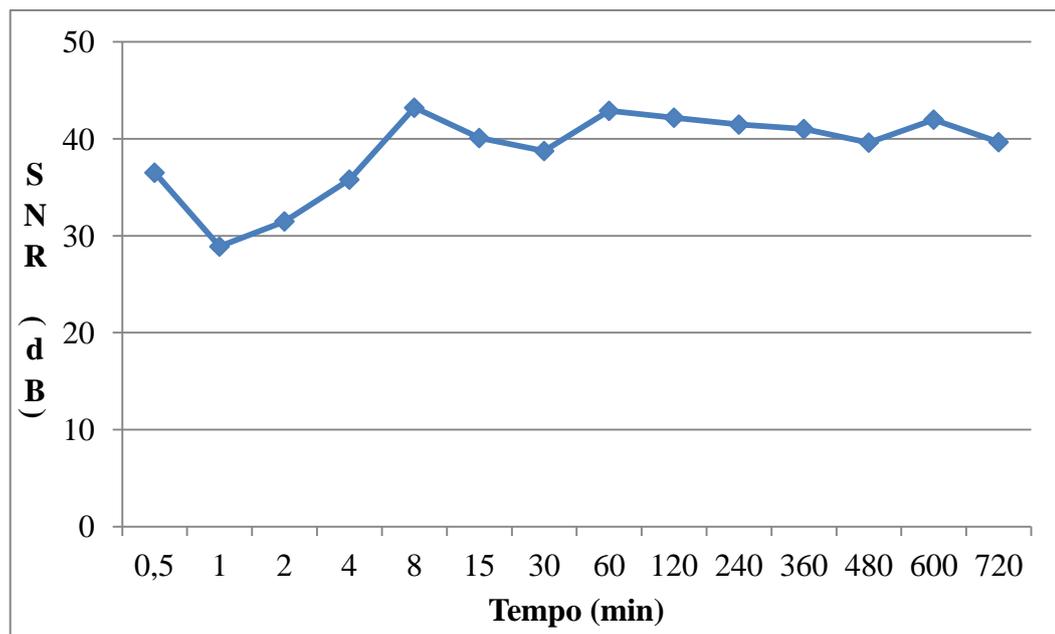
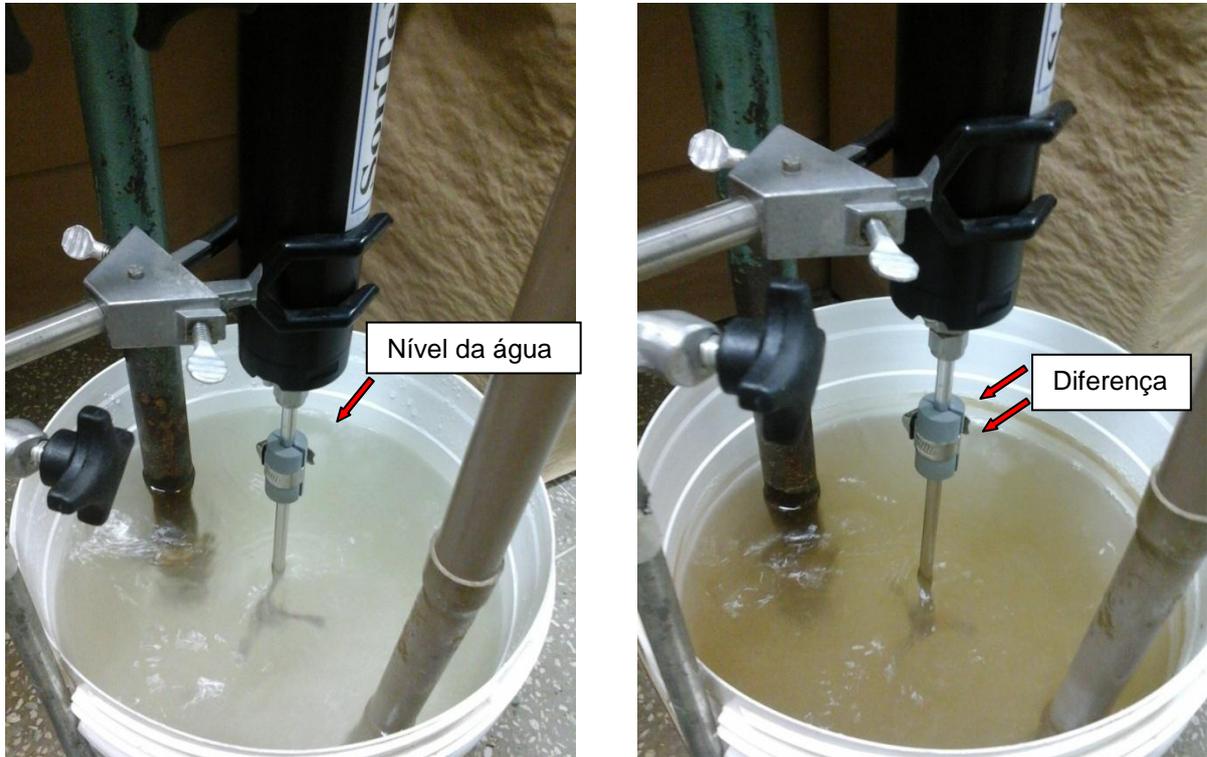


Figura 16 – Média dos três SNRs para ensaios com diferentes períodos de homogeneização variando entre 0,5 minuto a 720 minutos, utilizando solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L na posição de 12 cm do fundo do recipiente e tempo de coleta de 30 segundos. Fonte: Elaboração própria.

Foi possível observar durante os ensaios uma redução de aproximadamente dois litros do volume de água por evaporação durante o período de 12 horas. Com essa evaporação esperava-se que aumentasse os valores de SNR. Porém os valores obtidos foram menores ou iguais aos obtidos com menores tempos de mistura. É possível que isto tenha ocorrido devido

à aderência dos sedimentos nas bordas do recipiente, conforme pode ser visualizado na figura 17, o que compensou a maior CSS devido a redução do volume.



(a) Início da homogeneização.

(b) Após 12 horas de homogeneização.

Figura 17 – Detalhe do volume de água no recipiente no instante inicial e redução após 12 horas de homogeneização. Fonte: Elaboração própria.

Na figura 18 é ilustrada a variação da temperatura da água ao longo da realização dos ensaios onde se realizou a homogeneização da mistura água e sedimento por períodos de 4 horas, 8 horas e 12 horas.

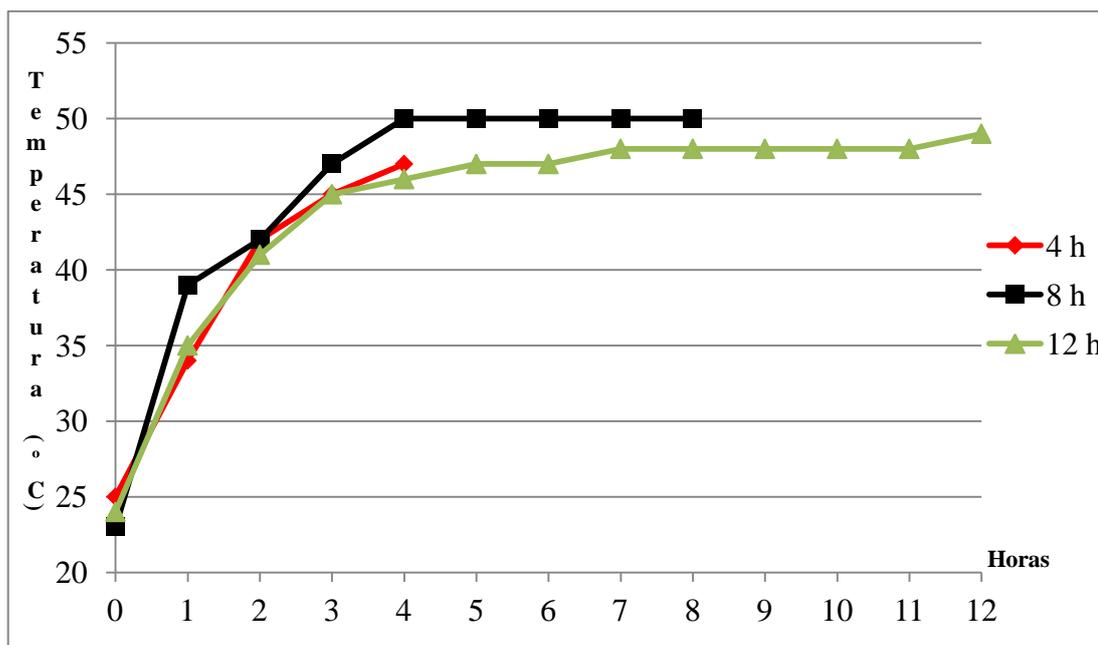


Figura 18 – Variação de temperatura ao longo do tempo de homogeneização para diferentes tempos de homogeneização, utilizando solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L na posição a 12 cm do fundo do recipiente e tempo de coleta de 30 segundos.

Durante os ensaios, foi possível observar que o motor da bomba esquentou muito, ocorrendo um aumento significativo na temperatura da água. Após 3 horas de homogeneização a temperatura que era inicialmente de 23 °C passou a valores próximos de 50 °C, que se mantém até o fim do período de 12 horas. Esse aumento de temperatura justifica a evaporação da água durante os ensaios.

Desta forma, optou-se por realizar ensaios com tempos de homogeneização de 2 minutos, buscando evitar o aumento de temperatura da água para tempos de mistura maiores, diminuição do volume de água no tanque por evaporação, além de manter a sugestão de 2 minutos de Guerrero et al. (2011 b).

6.1.6. Avaliação da repetibilidade dos ensaios

Com o objetivo de verificar a repetibilidade dos ensaios, foram realizadas dez medições em uma mesma posição com a mesma configuração do equipamento, localizada a 12 cm do fundo do recipiente, utilizando granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L.

Após, esses dados foram validados pelo teste t de Student determinados em nível de 5% de probabilidade de erro, confrontando 45 situações (1-2; 1-3; 1-4; 1-5; 1-6; 1-7; 1-8; 1-9; 1-10; 2-3; 2-4; 2-5; 2-6; 2-7; 2-8; 2-9; 2-10; 3-4; 3-5; 3-6; 3-7; 3-8; 3-9; 3-10; 4-5; 4-6; 4-7; 4-8; 4-9; 4-10; 5-6; 5-7; 5-8; 5-9; 5-10; 6-7; 6-8; 6-9; 6-10; 7-8; 7-9; 7-10; 8-9; 8-10 e 9-10) conforme apresentadas abaixo na tabela 8, onde letras iguais identificam valores que não diferem significativamente e letras diferentes identificam valores que diferem significativamente ao nível de 5% de significância.

Tabela 8 – Análise da capacidade de repetibilidade do experimento com tipo de solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos e coleta de 30 segundos.

| Ensaio | Dados | Média dos SNRs | Média do desvio padrão dos SNRs |
|--------|-------|-----------------------|---------------------------------|
| 1 | 1500 | 47,65 ^a | 4,63 |
| 2 | 1500 | 47,81 ^a | 4,66 |
| 3 | 1500 | 47,02 ^b | 4,37 |
| 4 | 1500 | 47,86 ^a | 4,35 |
| 5 | 1500 | 47,01 ^{bc} | 4,60 |
| 6 | 1500 | 47,07 ^{bd} | 4,59 |
| 7 | 1500 | 48,01 ^{ae} | 4,66 |
| 8 | 1500 | 47,63 ^{ah} | 5,17 |
| 9 | 1500 | 47,54 ^{abgh} | 4,53 |
| 10 | 1500 | 47,40 ^{afh} | 4,62 |

*Letras iguais não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância de 5%.

Conforme a tabela 8 é possível notar que a maioria dos vários de médias de SNR, obtidos com as mesmas condições de ensaios, ou seja, 27 situações diferem significativamente ao nível de 5%.

6.1.7. Parâmetros e condições dos ensaios definidos nos testes preliminares

A partir dos testes preliminares, avaliando a influência do uso de diferentes parâmetros de ensaio e condições de amostragem, concluiu-se que as melhores condições para a condução dos experimentos são as seguintes:

- Realizar os ensaios com o status do carregador de bateria do notebook desligado, pois houve diferença significativa a nível de significância de 5% nos diferentes intervalos de tempo nas três posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente como pode ser visualizado nas respectivas tabelas 3, 4 e 5.

- O tempo de aquisição de dados ficou definido em 30 segundos, pois após este tempo a mistura (água e solo) tem diminuída sua homogeneidade, ou seja, as partículas de sedimentos passam a depositar-se no fundo do recipiente.

- A faixa de velocidade ficou definida em 3 cm/s pelo fato de ser a faixa mais compatível com as velocidades observadas no tanque de amostragem.

- Como não houve diferença significativa a nível de 5% de significância na análise dos valores de média para as diferentes frequências, optou-se pela frequência de amostragem de 50 Hz pelo fato de que esta faz com que se obtenha um maior número de dados a cada coleta, sendo que assim a média e o desvio padrão calculados são mais representativos.

- O tempo de mistura ficou definido em um período de 2 minutos, seguindo o procedimento citado por Guerrero et al. (2011 b) e em concordância com os testes realizados para não haver muito aumento de temperatura e conseqüente evaporação do volume.

6.2. Análises das CSS x SNR

Inicialmente buscou-se avaliar a correlação entre CSS e SNR individualmente para cada tipo de solo, conforme apresentado na sequência.

Os gráficos a seguir ilustram alguns resultados utilizando solo 1 (Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico), com diferentes granulometrias (1 mm, 500 μ m, 250 μ m, 125 μ m e 63 μ m), frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s, com diferentes concentrações (5 mg/L,

10 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 250 mg/L, 500 mg/L e 1000 mg/L) e nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.

Para a construção de cada gráfico, utilizou-se a média de cada ensaio nas diferentes profundidades e concentrações para cada granulometria e SNR.

Na figura 19 é apresentada a média obtida para os diferentes SNRs após aplicação do filtro (PSTM), para as diversas CSS nas amostras para a granulometria de 1 mm.

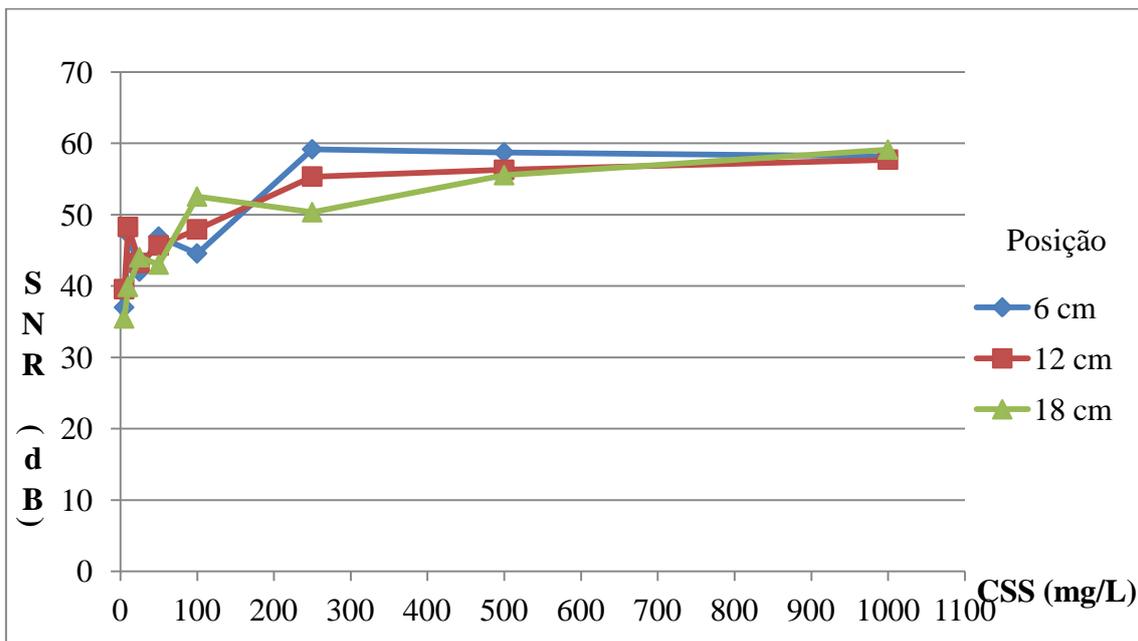


Figura 19 – Média dos SNRs, com aplicação do filtro (PSTM) para o solo 1, granulometria de 1 mm, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos.

No gráfico pode-se verificar a relação direta entre a CSS e o SNR nas três profundidades, porém, na profundidade 6 cm, essa tendência é menos evidente.

A seguir na figura 20 são apresentadas as médias das análises com aplicação do filtro (PSTM) para a granulometria de 500 μm .

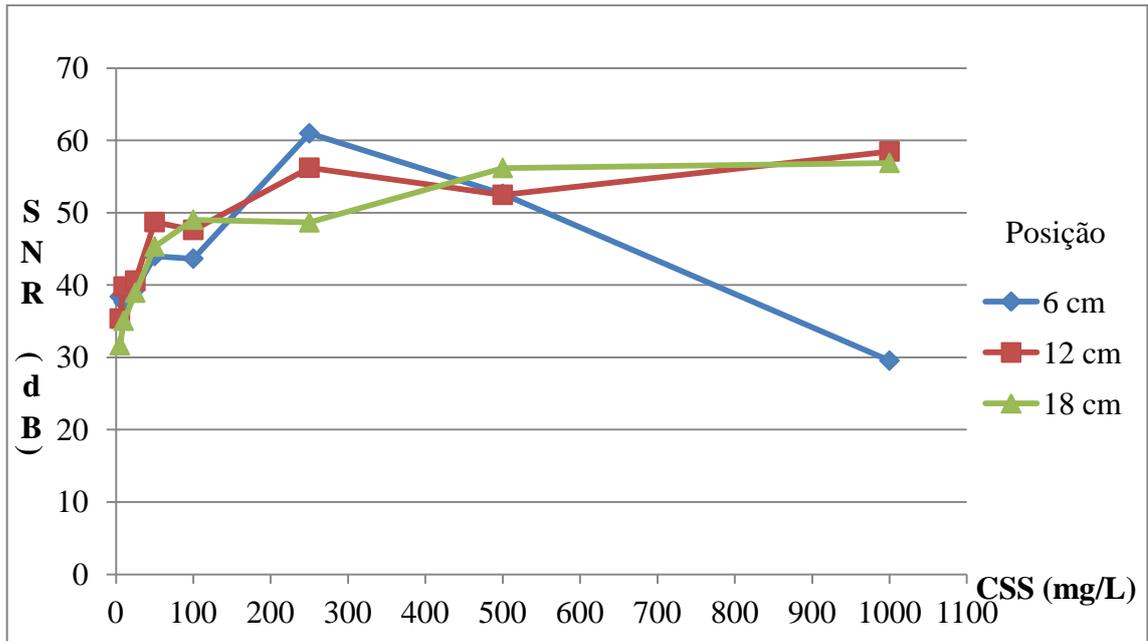


Figura 20 – Média dos SNRs, com aplicação do filtro (PSTM) para o solo 1, granulometria de 500 μm , frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos.

Para a granulometria de 500 μm , observa-se novamente no gráfico a relação direta, ou seja, no momento em que se aumenta a CSS ocorre um aumento do SNR. Na CSS de 1000 mg/L, nota-se uma diminuição de quase 50% no seu valor na posição a 6 cm do fundo do recipiente comparado com a posição de 12 cm e 18 cm.

Na figura 21 são apresentadas as médias das análises com aplicação do filtro (PSTM) para a granulometria de 250 μm .

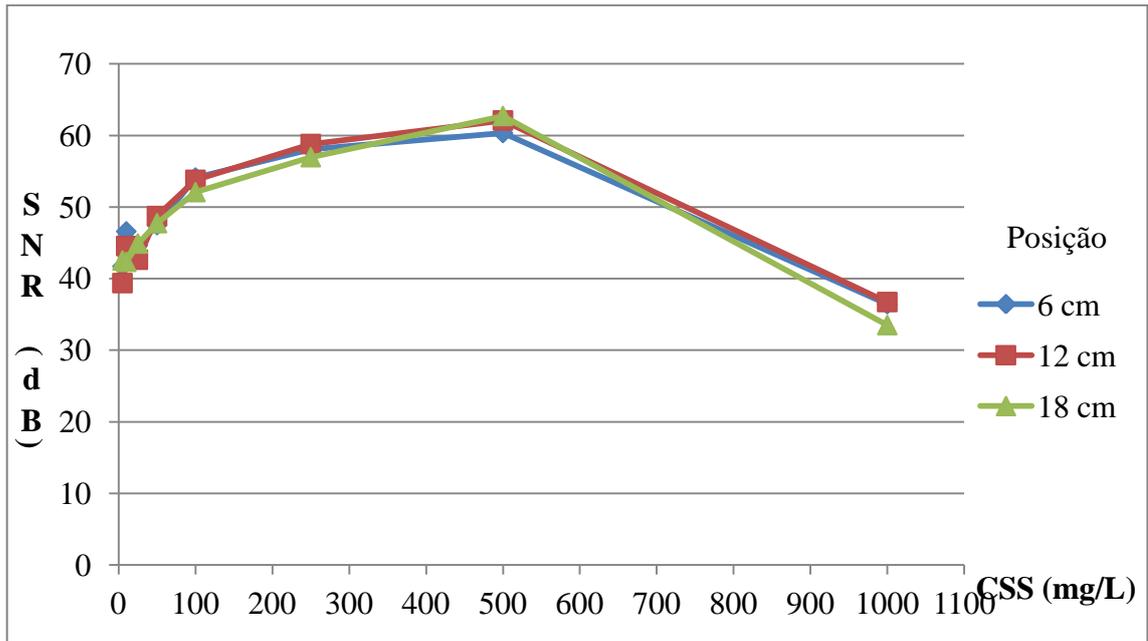


Figura 21 – Média dos SNRs, com aplicação do filtro (PSTM) para o solo 1, granulometria de 250 μm , frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos.

O gráfico para a granulometria de 250 μm apresenta média semelhante para as três profundidades em relação a cada concentração. Observou-se o aumento do SNR com a CSS, com exceção da última concentração, onde se verificou a diminuição.

Já na figura 22 são mostradas as médias das análises com aplicação do filtro (PSTM) para a granulometria de 125 μm .

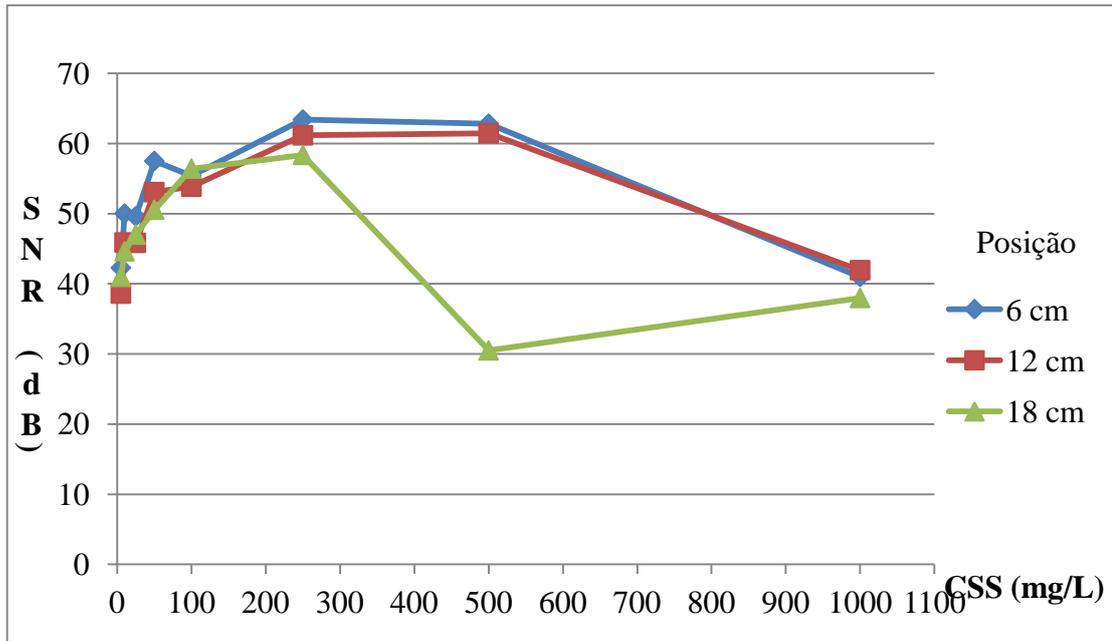


Figura 22 – Média dos SNRs, com aplicação do filtro (PSTM) para o solo 1, granulometria de 125 μm , frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos.

Para a granulometria de 125 μm , além do gráfico ter apresentado valores baixos na CSS de 1000 mg/L, também nota-se uma queda de quase 50% do valor das médias para a CSS de 500 mg/L na posição de 18 cm do fundo do recipiente em relação às demais profundidades.

Na figura 23 são apresentadas as médias das análises com aplicação do filtro (PSTM) para a granulometria de 63 μm para o SNR 1.

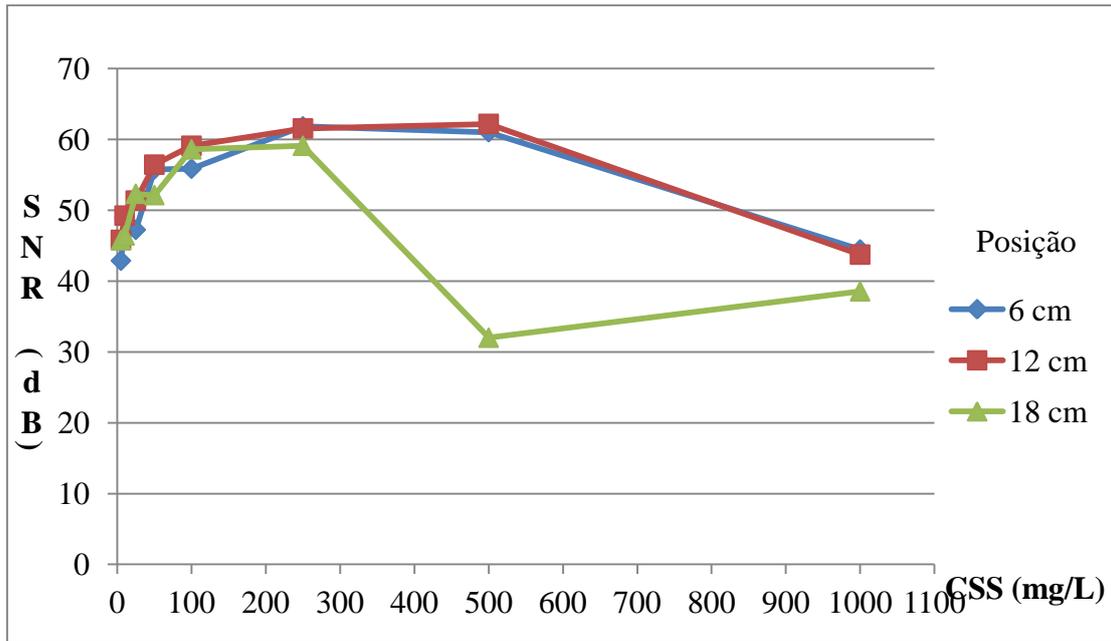


Figura 23 – Média dos SNRs, com aplicação do filtro (PSTM) para o solo 1, granulometria de 63 µm, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s e tempo de homogeneização de 2 minutos.

Para a granulometria de 63 µm, a CSS de 500 mg/L apresentou uma queda nos valores de SNRs na posição a 18 cm do fundo do recipiente assim como a CSS de 1000 mg/L que apresentou média dos SNRs menores para as três profundidades em relação às demais CSS.

Os resultados para os solos 2, 3, 4 e 5 são apresentados de forma análoga a apresentada para o solo 1 nos apêndices B, C, D e E respectivamente. As análises destes resultados indicam comportamentos semelhantes aos do solo 1, a não ser pela diminuição nos valores do SNR com o aumento das granulometrias, que é observada para o solo 1 e não ocorre para os demais solos. A relação direta SNR x CSS é mais evidente para os outros solos.

Já os apêndices de G a K apresentam os resultados para todos os solos (1, 2, 3, 4 e 5) sem aplicação do filtro (PSTM). Sendo possível notar uma diferença nos valores médios de SNR de até 5% entre a aplicação do filtro (PSTM) e sem aplicação do mesmo.

Na figura 24 é apresentado um resumo da variação da média dos SNRs filtrada para as diferentes CSS e faixas granulométricas na posição a 12 cm do fundo do recipiente para o solo 1.

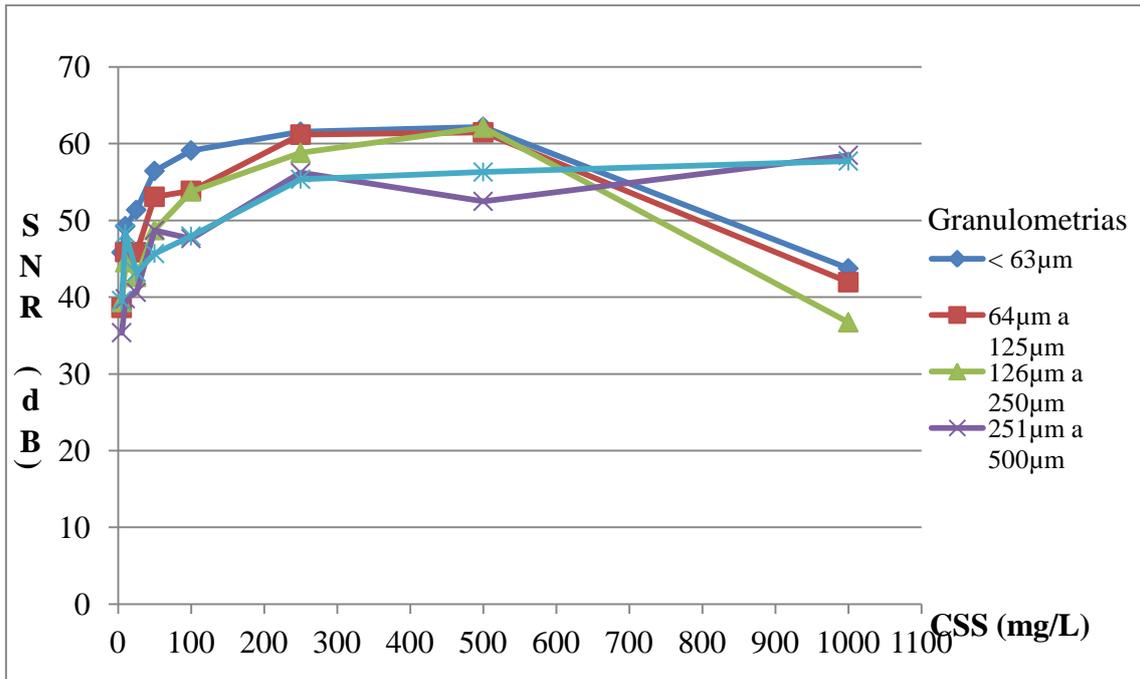


Figura 24 – Variação da média dos SNRs para diferentes CSS e faixas granulométricas, solo 1, filtrada (PSTM) para a posição a 12 cm do fundo do recipiente.

Observa-se através da figura 24 que há um aumento do sinal medido com o ADV com o aumento da presença de partículas em suspensão, até a concentração de 500 mg/L. Para as menores faixas granulométricas (< 250µm) observa-se um decaimento do SNR medido na concentração máxima.

A figura 25 apresenta a variação da média dos SNRs para diferentes CSS e granulometrias para os solos 2, 3, 4 e 5. Observa-se nessa figura que o comportamento do SNR para estes solos diferem do comportamento para o solo 1, não havendo decaimento nos valores medidos para as diferentes faixas granulométricas com o aumento da CSS utilizada.

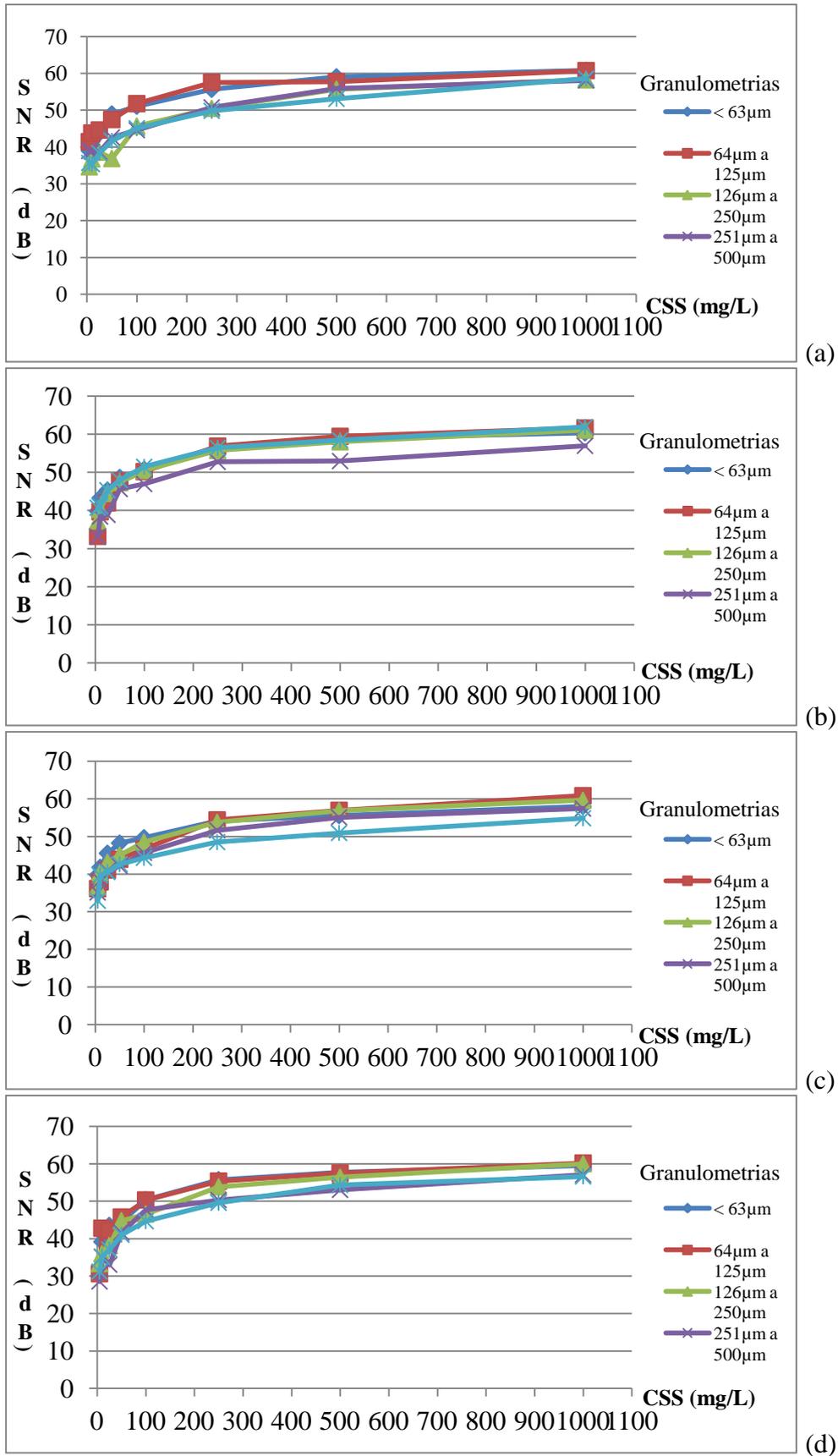


Figura 25 – Variação da média dos SNRs para diferentes CSS e faixas granulométricas, filtrada (PSTM) para a posição a 12 cm do fundo do recipiente para os diferentes tipos de solos: (a) solo 2; (b) solo 3; (c) solo 4; (d) solo 5.

Na figura 26 é apresentada a relação entre CSS e SNR para uma mesma granulometria (1 mm) com a média das posições dos SNRs e com aplicação do filtro PSTM para os cinco tipos de solos.

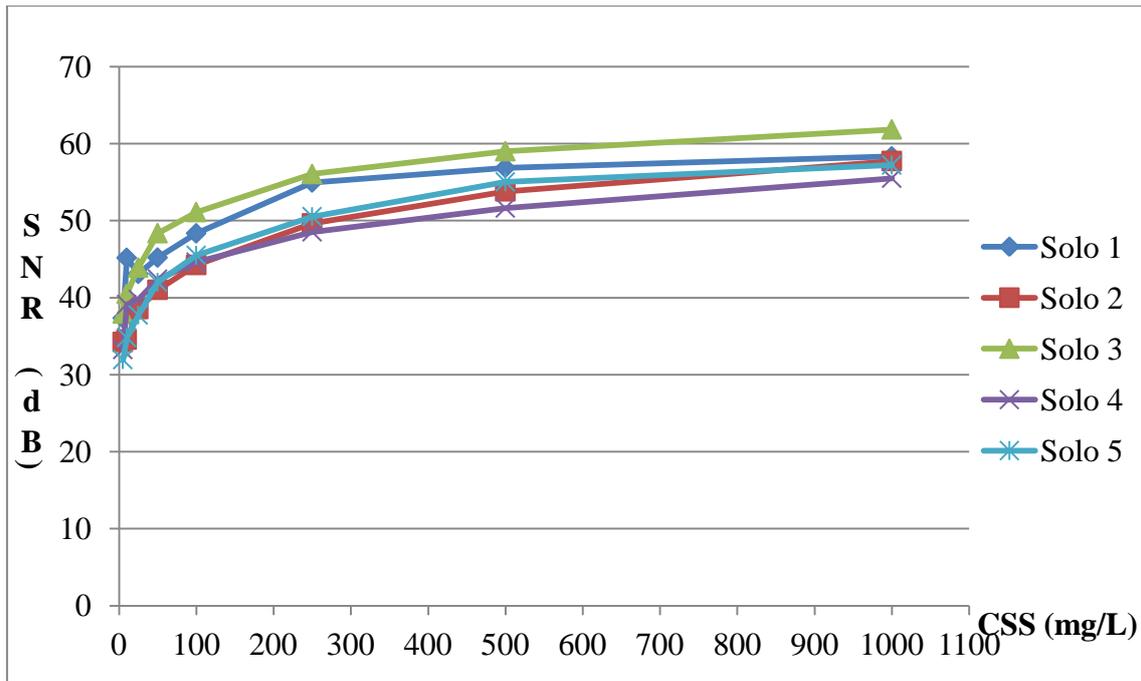


Figura 26 – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm), com aplicação do filtro (PSTM) na granulometria de 1 mm para os diferentes tipos de solos.

Conforme pode ser observado (Figura 26), o solo 3 apresentou o valor médio do SNR maior que os demais, sendo que nas CSS de 5 mg/L, 25 mg/L e 250 mg/L apresentou valores médios de SNR iguais ao do solo 1, e este teve um pico em sua média na CSS de 10 mg/L, para as demais CSS apresentou valores menores que no solo 3. Já os solos 2, 4 e 5 apresentaram valores semelhantes entre eles.

Com o objetivo de verificar se há diferença significativa entre os diferentes tipos de solos, realizou-se uma análise estatística, utilizando o teste t de Student nos dados na CSS de 5 mg/L, confrontando 10 situações (1-2; 1-3; 1-4; 1-5; 2-3; 2-4; 2-5; 3-4; 3-5 e 4-5). Embora a figura 26 indique que há uma mesma tendência do comportamento do SNR em função da concentração de sedimentos, para uma mesma granulometria, analisando diferentes tipos de solo, não se pode dizer que os valores independem do tipo de solo, já que a aplicação do teste t indica que para um nível de significância de 5% há diferenças nos valores.

Na figura 27 são apresentadas a média do SNR para os diferentes tipos de solos para a granulometria de 500 μm , com aplicação do filtro (PSTM) nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm).

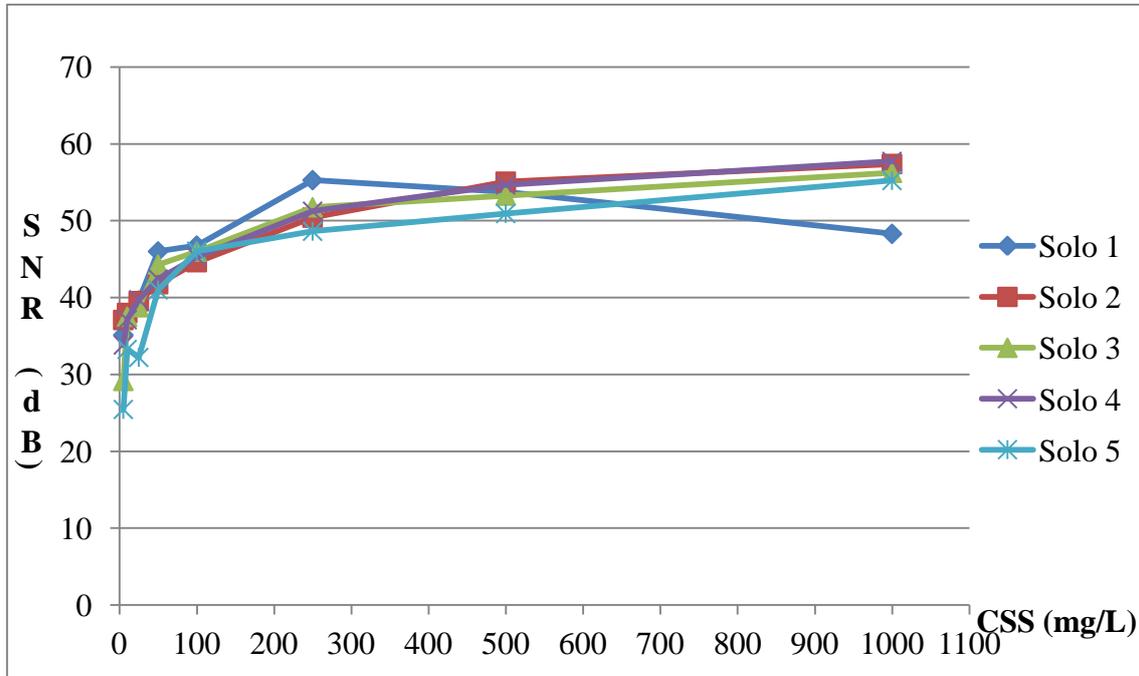


Figura 27 – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm), com aplicação do filtro (PSTM) na granulometria de 500 μm para os diferentes tipos de solos.

Para a granulometria de 500 μm , o solo 2 apresentou nas CSS de 5 mg/L, 10 mg/L e 25 mg/L um valor médio de SNR acima dos demais, a partir da CSS 50 mg/L até 250 mg/L o solo 1 apresentou valores médios maiores, voltando o solo 2 a apresentar valores médios maiores nas CSS de 500 mg/L e 1000 mg/L. Os solos 2, 3 e 4 apresentaram comportamentos semelhantes. O solo 1 teve decaimento nas CSS 500 mg/L e 1000 mg/L. Além disso, o solo 5 apresentou valores médios baixos nas CSS de 5 mg/L, 10 mg/L e 25 mg/L e após comportamento semelhante aos solos 2, 3 e 4.

Aplicou-se o teste t de Student novamente nos dados na CSS de 5 mg/L, onde foram confrontadas 10 situações para os cinco tipos de solos (1-2; 1-3; 1-4; 1-5; 2-3; 2-4; 2-5; 3-4; 3-5 e 4-5), ocorrendo diferença significativa a nível de 5 % de significância em todas as confrontações.

Para a granulometria de 250 μm (Figura 28), em geral, todos os tipos de solos apresentaram um aumento no valor do SNR com o aumento das CSS, a não ser o solo 1 nas CSS 25 mg/L e 1000 mg/L e o solo 2 na CSS 50 mg/L.

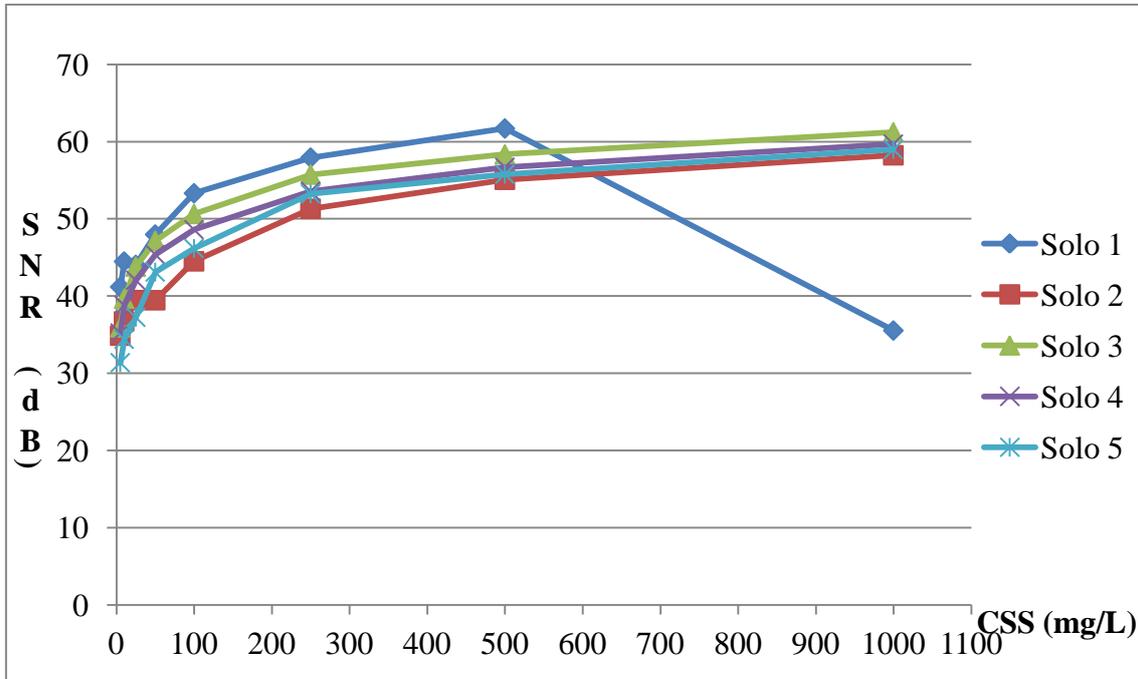


Figura 28 – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm), com aplicação do filtro (PSTM) na granulometria de 250 μm para os diferentes tipos de solos.

Foi realizada análise estatística por meio do teste t de Student nos dados na CSS de 5 mg/L. Confrontou-se 10 situações para os diferentes tipos de solos (1-2; 1-3; 1-4; 1-5; 2-3; 2-4; 2-5; 3-4; 3-5 e 4-5). A única confrontação que não ocorreu diferença significativa a nível de 5% de significância foi o solo 2 com o solo 4.

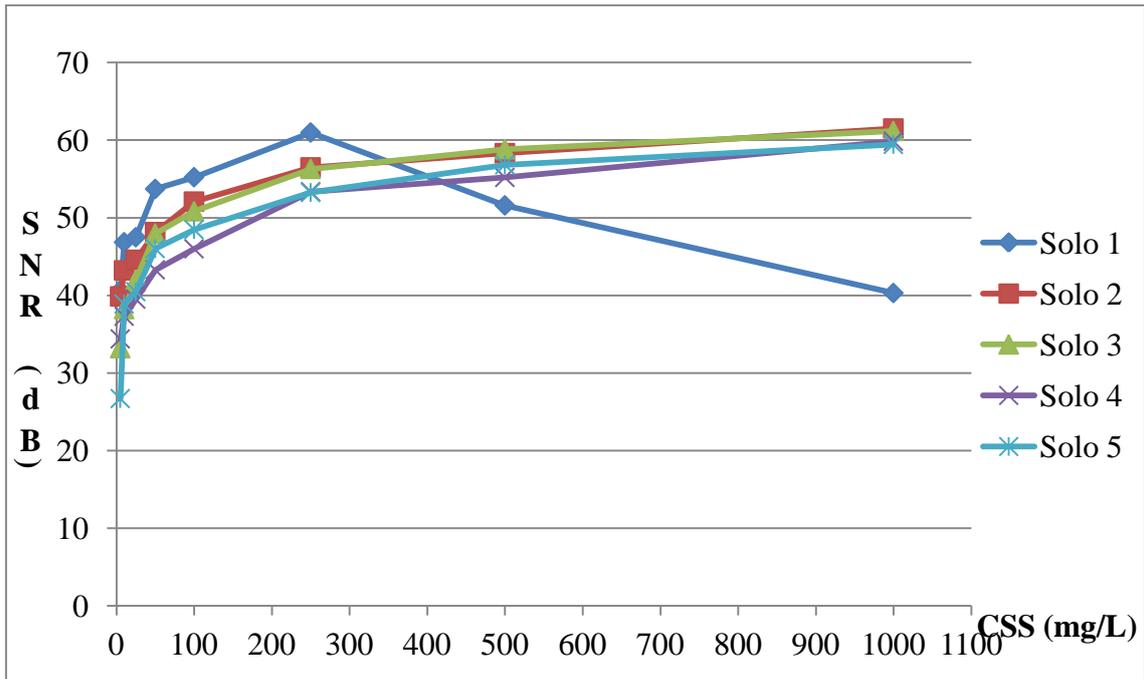


Figura 29 – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm), com aplicação do filtro (PSTM) na granulometria de 125 μm para os diferentes tipos de solos.

Já para a granulometria de 125 μm , conforme a figura 29, todos os tipos de solo apresentaram aumento no valor do SNR com o aumento da CSS, a não ser o solo 1 para as CSS de 500 mg/L e 1000 mg/L.

Com o objetivo de verificar se há diferença significativa entre os diferentes tipos de solos, foi realizada análise estatística utilizando o teste t de Student nos dados para a CSS de 5 mg/L, confrontando 10 situações entre os solos (1-2; 1-3; 1-4; 1-5; 2-3; 2-4; 2-5; 3-4; 3-5 e 4-5), sendo que todas as confrontações apresentaram diferença significativa a nível de 5% de significância.

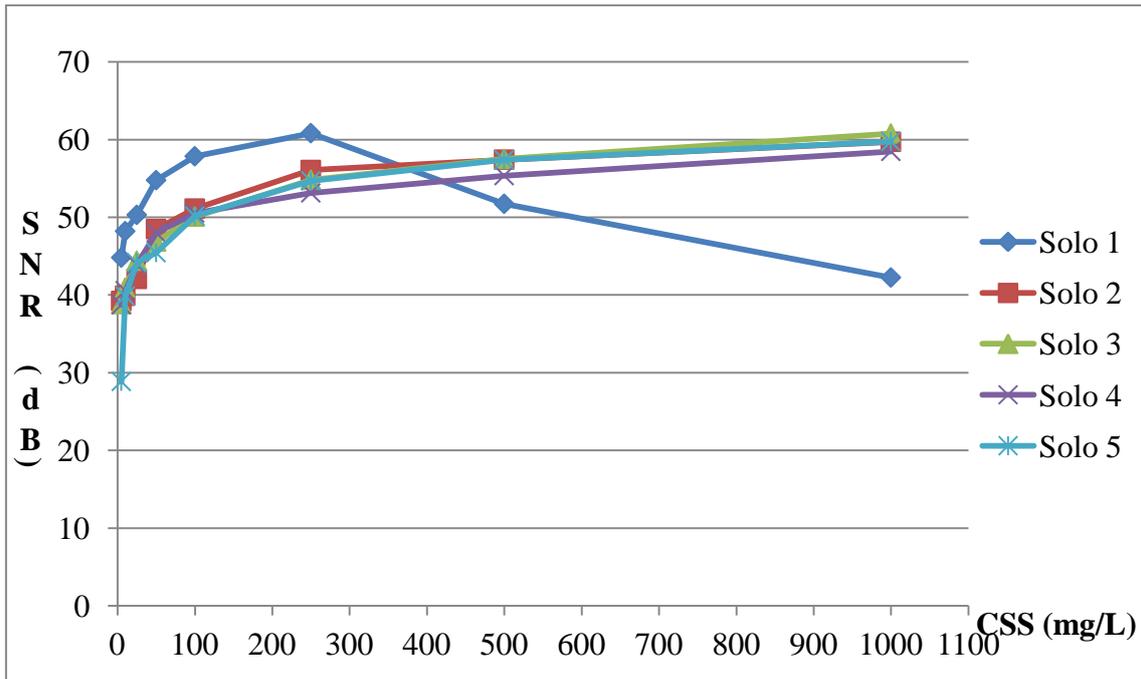


Figura 30 – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm), com aplicação do filtro (PSTM) na granulometria de 63 μ m para os diferentes tipos de solos.

E por último, analisando a granulometria de 63 μ m (Figura 30), o SNR apresenta aumento conforme o aumento da CSS para os cinco tipos de solos e concentrações, com exceção do solo 1 que a partir da CSS de 250 mg/L obteve um decaimento no seu valor médio de SNR.

Aplicou-se o teste t de Student nos dados para a CSS de 5 mg/L, onde foram confrontadas 10 situações para os diferentes tipos de solos (1-2; 1-3; 1-4; 1-5; 2-3; 2-4; 2-5; 3-4; 3-5 e 4-5), sendo que a única confrontação que apresentou diferença significativa a nível de 5% de significância foi a do solo 3 com o solo 4.

Com objetivo de analisar se a separação por faixas granulométricas influenciavam nos resultados, com as mesmas configurações utilizadas nos ensaios, realizou-se um teste com o solo 3, para cinco faixas granulométricas e com o mesmo solo no seu estado integral (sem divisão por faixas granulométricas). Na figura 31 são apresentadas a média dos valores filtrados dos SNRs para as diferentes granulometrias do solo 3 e para o solo 3 integral (todas as granulometrias).

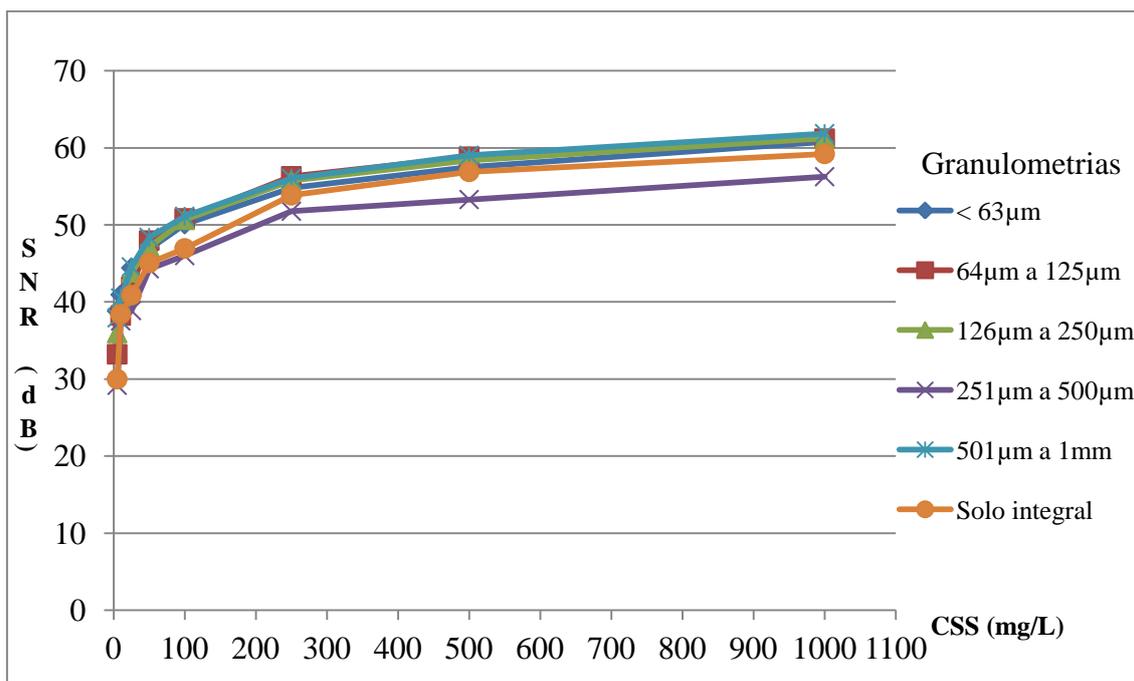


Figura 31 – Média dos valores de SNRs com aplicação do filtro (PSTM) para as diferentes granulometrias do solo 3 e para o solo 3 integral (todas as granulometrias).

A figura 31 mostra a relação direta do aumento médio do sinal medido pelo equipamento na proporção que aumenta as concentrações de sedimentos. Pode-se notar um aumento semelhante nas diferentes concentrações a partir da CSS de 5mg/L. O comportamento das cinco faixas granulométricas difere, ocorrendo variações médias de SNR de 32 dB a 42 dB para a primeira concentração de 5mg/L, quando a média do SNR para esta mesma concentração para o solo integral foi de 33 dB. Os valores para as demais CSS ficaram próximos do valor médio apresentado para o solo integral.

Esses resultados vem ao encontro com o trabalho de Xavier et al (2012), que utilizou um ADV de 6 MHz para faixas granulométricas de 60 µm a 90 µm em um recipiente de 40 cm de diâmetro por 50 cm de altura para duas profundidades, de 12 cm e 20 cm do fundo, utilizando sete CSS (0,005 g/L, 0,01 g/L, 0,025 g/L, 0,05 g/L, 0,10 g/L, 0,25 g/L e 0,5 g/L) e duas bombas de aquários para o processo de homogeneização. Foram obtidos valores médios para a CSS de 10 mg/L de 40,87 dB para a profundidade de 12 cm e de 40,24 dB para a posição a 20 cm do fundo do recipiente, valores estes próximos aos observados nesta pesquisa (37,52 dB a 40,93 dB). Já para a CSS de 250 mg/L os valores de SNR foram de 52,02 dB para 12 cm e 51,49 dB para 20 cm, que também foram valores próximos neste trabalho (51,76 dB a 56,29 dB).

7. CONCLUSÃO

O ADV é um equipamento que surgiu com o objetivo de avaliar velocidades médias tridimensionais. No entanto, outras informações têm sido obtidas com medições a partir de ADVs, como avaliações de padrões de turbulência do escoamento, a partir das flutuações de velocidades medidas e estimativas de sedimentos em suspensão, a partir das leituras da relação sinal/ruído, associada à presença e proporção de material em suspensão.

Neste trabalho são apresentados resultados de um estudo experimental que foi realizado em um ambiente controlado testando a resposta do ADV para testes conduzidos em amostras de características conhecidas a fim de avaliar a possibilidade do uso do ADV para quantificar a concentração de sedimentos em suspensão.

Os primeiros testes realizados com o ADV foram utilizados como um ensaio para que se desenvolvesse da melhor forma possível uma metodologia para aquisição de dados em laboratório. Com isso, foi possível determinar os melhores parâmetros de configuração do equipamento (frequência de amostragem de 50 Hz e velocidade do equipamento de 3 cm/s), para realizar a coleta de dados e, assim, atingir os objetivos propostos neste trabalho. Além da avaliação dos parâmetros do equipamento, foi realizada como teste preliminar a avaliação da repetibilidade dos ensaios, sendo que foram encontrados bons resultados, de onde se pode concluir que os dados obtidos das coletas são seguros e de confiança.

Percebeu-se nessa análise preliminar, que a correta definição dos parâmetros de ensaio interfere consideravelmente nos resultados obtidos, já que foi realizada uma análise abrangente das configurações e condições dos ensaios.

O aparato experimental proporcionou boa homogeneização às diferentes misturas de água e solo, com granulometrias e concentrações de sedimentos em suspensão variadas, permitindo a realização de medições com o ADV.

Os dados coletados mostraram o aumento do SNR em relação ao aumento da concentração de sedimentos em suspensão para os diferentes tipos de solos para as cinco granulometrias, sendo que as melhores correlações entre o eco e a CSS ocorreram para os ensaios com os solos 2, 3 e 4.

Através das medições com o ADV em laboratório, foi possível investigar a relação sinal/ruído para diferentes faixas granulométricas e CSS de solo quando em suspensão em água. Notou-se que os valores encontrados para o SNR não seguiram uma regra determinada

em relação à faixa granulométrica do solo. Ou seja, não se pode concluir que o aumento da faixa granulométrica indica o aumento do SNR, já que para uma mesma CSS os valores de SNR não necessariamente aumentaram com o aumento da granulometria.

É possível concluir para os diferentes tipos de solos, que existe uma relação direta entre o aumento das concentrações de sedimentos e o sinal medido pelo equipamento.

Foi ainda possível perceber que o tipo de solo utilizado nos ensaios não foi um fator decisivo para os resultados obtidos, já que para a maioria dos ensaios os resultados encontrados foram semelhantes quando comparados os diferentes tipos de solo, exceto solo 1 para maiores concentrações ($>250 \mu\text{m}$).

Comparando as análises realizadas com o solo 3 em sua forma integral (sem separação granulométrica) com os resultados obtidos das análises das faixas granulométricas do mesmo solo em separado, pode-se notar que ambas apresentaram comportamento muito semelhante no que diz respeito aos valores de SNR, podendo-se concluir que a separação por faixas granulométricas não foi um fator de grande interferência nos resultados obtidos para os valores do SNR em relação aos valores obtidos com o solo integral.

8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de continuidade desta pesquisa, sugere-se para trabalhos futuros o seguinte:

- Realizar coletas de água com sedimentos no campo para confrontar a avaliação da CSS em conjunto com medições com o ADV, de forma simultânea, desenvolvendo alguns ensaios com a mesma configuração utilizada neste trabalho, a fim de determinar curvas de calibração para o equipamento.

- Comparar os resultados obtidos em campo com as correlações obtidas neste trabalho, bem como confrontar estes resultados com outros obtidos por métodos convencionais com o sinal obtido pelo ADV.

- Realizar alguns ensaios colocando o aparato experimental dentro de uma gaiola de Faraday com a mesma configuração utilizada neste trabalho a fim de analisar os resultados obtidos sem nenhuma interferência provinda da energia elétrica.

- Analisar amostras de diferentes solos em sua forma integral e separados por faixas granulométricas a fim de avaliar a influência da separação por faixas granulométricas nos resultados obtidos para os valores de SNR.

- Realizar os ensaios em um ambiente climatizado com baixa temperatura ou usar gelo em torno do recipiente, tentando evitar que ocorra aumento na temperatura da água e conseqüentemente ocorra evaporação.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G. C. P. Caracterização física e classificação dos solos. Universidade Federal de Juiz de Fora – Faculdade de Engenharia, Departamento de Transporte, 2005, 145 p.

ANZOLIN, M. A. D.; MUTTI, L. S. M. Relatório Técnico: Solos da bacia hidrográfica do Vacacaí-Mirim. Porto Alegre: Acordo DNOS – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, 1987/1988, 20f.

BASSI, L. **Estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Lageado São José**, Chapecó, SC. 1990. 103f. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.

BELING, F. A. **Hidrograma de projeto utilizando o Modelo Kineros 2 em uma pequena bacia de encosta em Santa Maria**. 2010. 73f. Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

BENSI, M. **Aplicação do correntômetro acústico ADCP em ambientes marinhos e estuários do Ceará e Paraíba- nordeste do Brasil**. 2006. 134f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

BIGARELLA, J. J. (organizador). Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2003, p.877-1436.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F.R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: UFGS; São Paulo: USP/ABRH, 1993. p. 915-43.

BRANCO, N. Avaliação de metodologias para a estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas. 1998. Dissertação de Mestrado. PPGEA-UFSM.

BROWN, R., and Chanson. Turbulence and suspended sediment measurements in an urban environment during the Brisbane River flood of January 2011. In Journal of Hydraulic Engineering, v. 139, 2013, p.1943.

CARVALHO, K. S. **Monitoramento e Caracterização Hidrossedimentométrica de uma Pequena Bacia Hidrográfica Periurbana**. 2003. 160 p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ppgec/wp-content/uploads/Kerllen.pdf>>. Acesso em: 11/09/2014.

CARVALHO, N. O.; CATHARINO, M. G. Avaliação do assoreamento de reservatório da UHE Itaipu. Anais. X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul. Gramado-RS, 1993.

_____. **Hidrossedimentologia Prática**. CPRM, ELETROBRÁS. Rio de Janeiro, RJ, 1994, 372 p.

_____. FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL. 154 p. Brasília, 2000.

CARVALHO, T. M. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. Revista Brasileira de Geografia Física. RBGF. vol. 1:1, Mai. pp. 73-85, 2008.

CASAGRANDE, L. **Avaliação do parâmetro de propagação de sedimentos do modelo de williams (1995) na bacia do rio Vacacaí-Mirim com o auxílio de técnicas de geoprocessamento**. 2004. 226 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ppgec/wp-content/uploads/CASAGRANDE.pdf>>. Acesso em: 20/03/2014.

CHANSON, H.; TAKEUCHI, M.; TREVETHAN, M. **Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary**. Journal of Environmental Management- Elsevier, Australia, v.88, p. 1406-1416, 2007.

DNAEE. **Normas e recomendações hidrológicas**. Anexo III – Sedimentometria. 1970.

FILHO, G.L.T. et al. **O Uso do Adcp em Pequenos e Médios Cursos D'água**. In: Grupo de trabalho sobre hidromecânica - 5ª Reunião, Montevideu – Uruguai, 1999, 10p.

DORNELLES, A. M. **Utilização de um perfilador acústico de correntes por efeito doppler (ADCP) para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS)**. 2009. 127 f. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental- Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ELLIOT, W. J.; WARD, A. D.; Soil Erosion and Control Practices (Capítulo 6). In: **Environmental Hydrology**. Lewis / CRC Press, Boca Raton, Florida: 1995, 462 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. revisão atualizada. Rio de Janeiro, 1997. 212 p. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

GAMARO, P. E. (Organizador). **Curso de medidores de vazão acústica Doppler – Apostila módulo básico**. Agência Nacional de Águas - ANA. Foz do Iguaçu, Paraná. 1ª ed, 40p., 2006.

GAMARO, P. E. M. (2009). Estudo do uso de medidores acústicos Doppler estáticos de velocidades para avaliar sedimentos em suspensão em rios. in XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, 2009.

GORING, D.G and NIKORA, V.I. (2002). Fluctuations of suspended sediment concentration and turbulent sediment fluxes in an open-channel flow. In *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128 (2), pp. 214-224.

GRAF, W.H. *Hydraulics of sediment transport*. New York: McGraw-Hill, 1971. 509p.

GUENNEC, B. L, et al. (2010). Avaliação das vazões específicas de sedimentos numa planície de maré usando medições com ADV: foz do rio Amazonas. XXIV Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Punta Del Este, Uruguay 2010.

GUERRERO, N.; RÜTHER, M. SZUPIANY. Laboratory validation of acoustic Doppler current profiler (ADCP) techniques for suspended sediment investigations. *Flow Measurement and Instrumentation- SciVerse Science Direct*, v. 23, pp. 40-48, 2011- B.

HA, H., HSU, W.-Y., MAA, J.-Y., SHAO, Y., HOLLAND, C., (2009). Using ADV backscatter strength for measuring suspended cohesive sediment concentration. *Continental Shelf Research* 29, pp. 1310-1316.

KOSTASCHUK, R.; BEST, J.; VILLARD, P.; PEAKAL L.; FRANKLIN, M. Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology, Science Direct, Canada*, v. 68, p. 25-37, jul./dez. 2005.

LANDERS, M. N, 2010. Review of methods to estimate fluvial suspended sediment characteristics from acoustic surrogate metrics. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, USA.

LEMMIN, U., LHERMITTE, R. (1999). Discussion of “ADV Measurements of Turbulence: Can We Improve Their Interpretation?” by Nikora, V. I. y Goring, D. G. *In Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125. 1999, n. 9, pp. 987-988.

LOHRMANN, A., CABRERA, R., GRAUS, N. C. (2000). Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for laboratory use. In. *Anais of the ASCE Conference on Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*, Buffalo, New York, 1994, pp. 351–365.

MAIER, C. **Variabilidade intra-evento da origem das fontes de sedimentos em uma bacia hidrográfica rural**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 124 p. 2013.

MEDEIROS, M. **Carga de Poluição Difusa em Bacias Hidrográficas com Diferentes Impactos Antrópicos**. 2012. 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/ppgec/wp-content/uploads/Marielle%20Medeiros%20de%20Souza_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20PGEC.pdf>. Acesso em: 03/08/2014.

MCCULLY, P. **Ríos silenciados. Ecología y política de las grandes represas**. Argentina: Proteger Ediciones, 450 p. 2001.

MINELLA, J.P.G. **Utilização de técnicas hidrossedimentométricas combinadas com a identificação de fontes de sedimentos para avaliar o efeito do uso do manejo do solo nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica rural do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 162 p. 2007.

MOLINAS, A.; WU, B. Transport of Sediment in Large Sand-Bed Rivers. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, n. 2, Oct., pp. 135-146. 2001.

MULLER, A.C. **Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Makron Books. São Paulo. 412 p. 1995.

NAGLE, G.N.; FAHEY, T.J.; LASSOIE, P.J. **Management of sedimentation in tropical watersheds**. *Environmental Management*, Nova York, v. 23, n° 4, p. 441-452. 1999.

NIKORA, V.I., and GORING, D.G. (1998). "ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?" *In Journal of Hydraulic Engineering*, v. 124 (6), pp. 630-634.

ORWIN, J. F.; SMART, C. C. An inexpensive turbidimeter for monitoring suspended sediment. Department of Geography, The University of Western Ontario, London, Canada *Smart/Geomorphology* 68 (2005) 3–15. Elsevier B. V. Disponível em: www.elsevier.com/locate/geomorph. Acesso em 19 fev. 2014.

PAIVA, E. M. C. D., PAIVA, J.B.D., COSTAS, M.F.T., SANTOS, F.A. (2001). "**Concentração de sedimentos em suspensão em uma pequena bacia hidrográfica em urbanização.**" Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, RJ.

PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J.B.D.; PARANHOS, R.M. Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas Rurais. **Caracterização quali-quantitativa da produção de sedimentos**, 2000.

PAIVA, J. B. D., PAIVA, E. M. C. D.; VILLELA, S. M. Avaliação hidrossedimentométrica do trecho não revestido do canal adutor do projeto de transposição das águas do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 2, p. 81-114, Dez 1995.

PARANHOS, R. M. **Avaliação de metodologia para a estimativa de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural de encosta**. 2003. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ppgec/wp-content/uploads/Raquel.pdf>>. Acesso em: 15/08/2014.

PAVANELLI, D.; PAGLIARANI, A. Soil and Water: Monitoring Water Flow, Turbidity and Suspended Sediment Load, from an Apennine Catchment Basin, Italy, *Biosystems Engineering*, Volume 83, dezembro 2002, p. 463-468. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WXV-47C8VV1-B/1/8e92f4eed49ab6f93c04056a313d0fa8>).

PEREIRA, M. A. F. **Processos hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaço temporais no bioma mata atlântica**. 2010. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ppgec/wp-content/uploads/MARCO%20ALESIO.pdf>>. Acesso em: 20/07/2014.

PINTO, V. G.; MORAES, M. F.; RIBEIRO, C. B. **Análise comparativa entre velocímetro acústico de efeito doppler e molinete hidrométrico: estudo de caso no Ribeirão Espírito Santo – Juiz de Fora (mg)**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 11, 2013. Anais. Bento Gonçalves: ABRH, 2013.

SANAGIOTTO, D. G. **Análise da macroturbulência do escoamento em escadas para peixes por bacias sucessivas**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 320 p. 2007.

SCHUCK, A. **Utilização do acoustic doppler profiler (adp) para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (css) e turbidez**. 2013. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/ppgec/wp-content/uploads/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Aline_Schuck.pdf>. Acesso em: 05/08/2013.

SIMONS, D. B. SENTÜRK, F. Sediment transport technology Fort collins. USA Water Resources Publications, 1976.

SIMÕES, S. J. C.; COIADO, E. M. Processo Erosivo (Capítulo 10): In: **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. PAIVA, J. B.D.de/ PAIVA, E. M. C. D. de (Organizadores). Porto Alegre, ABRH, 2003, 628 p.

SONTEK. Sontek ADV Field. Acoustic Doppler Velocimeter. Technical Documentation. San Diego, USA, 2001.

TERABE, F. R.; TANIGUCHI, E. R.; SANTOS, I.; OTA, J. J.; MAYERLE, R.; BUBA, H.; GONÇALVES, F. (2005). “**Uso do perfilador acústico (ADCP) para medição do transporte sólido em suspensão**” In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005. Anais. João Pessoa: ABRH, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 1998.

VERNEY, R., et al. (2007). The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats: Impact of boat traffic and wind. *Continental Shelf Research*, Vol. 27, pp. 594-612.

WAHL, T. L. “Analyzing ADV Data Using WinADV. Proceedings of the Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management 2000, Minneapolis, Minnesota, 2000.

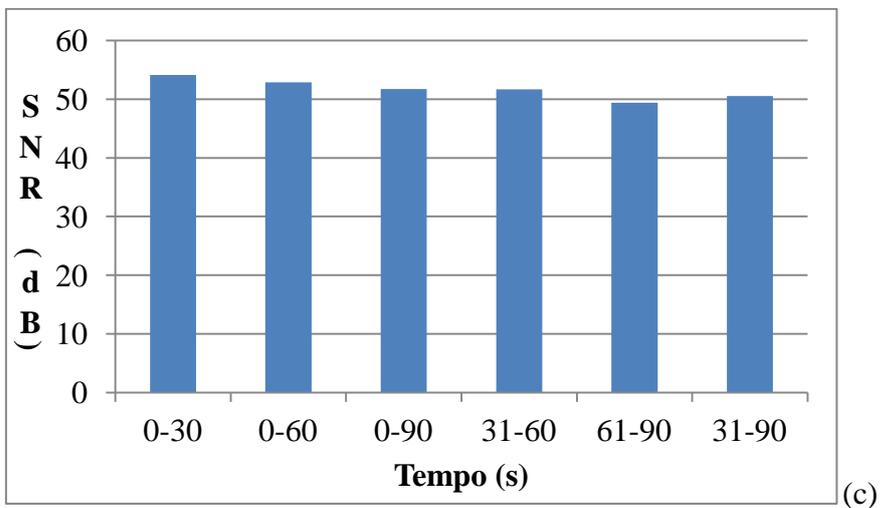
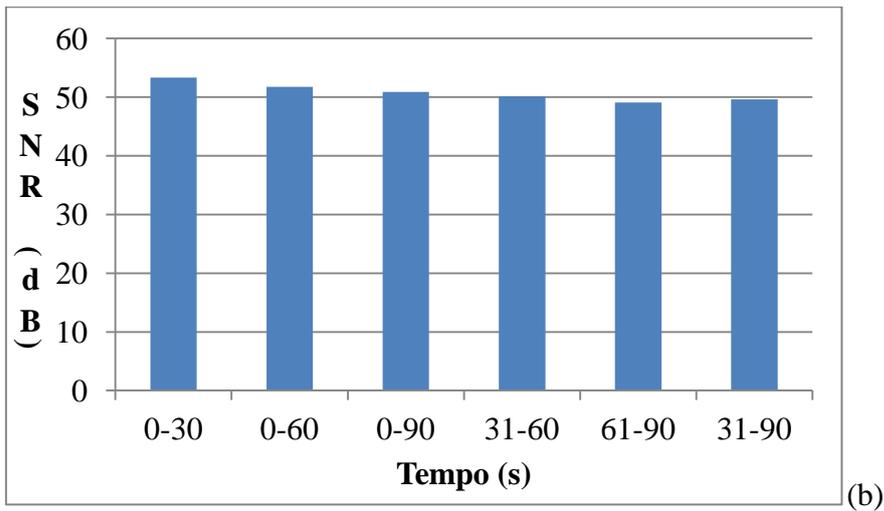
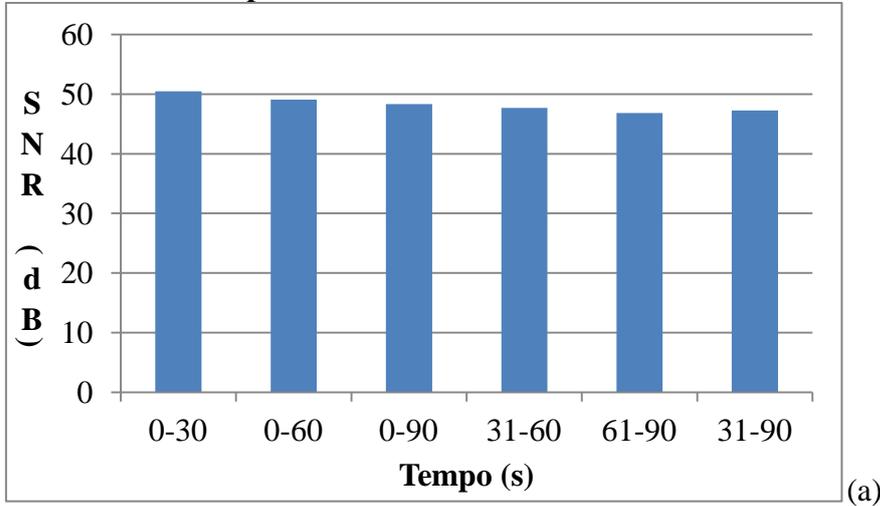
WAHL, T. L. Discussion of “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data” by Goring, D.G. e Nikora, V. I. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 9, p. 987-988, 2003.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on sediment management and measurement**. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization. 2003.

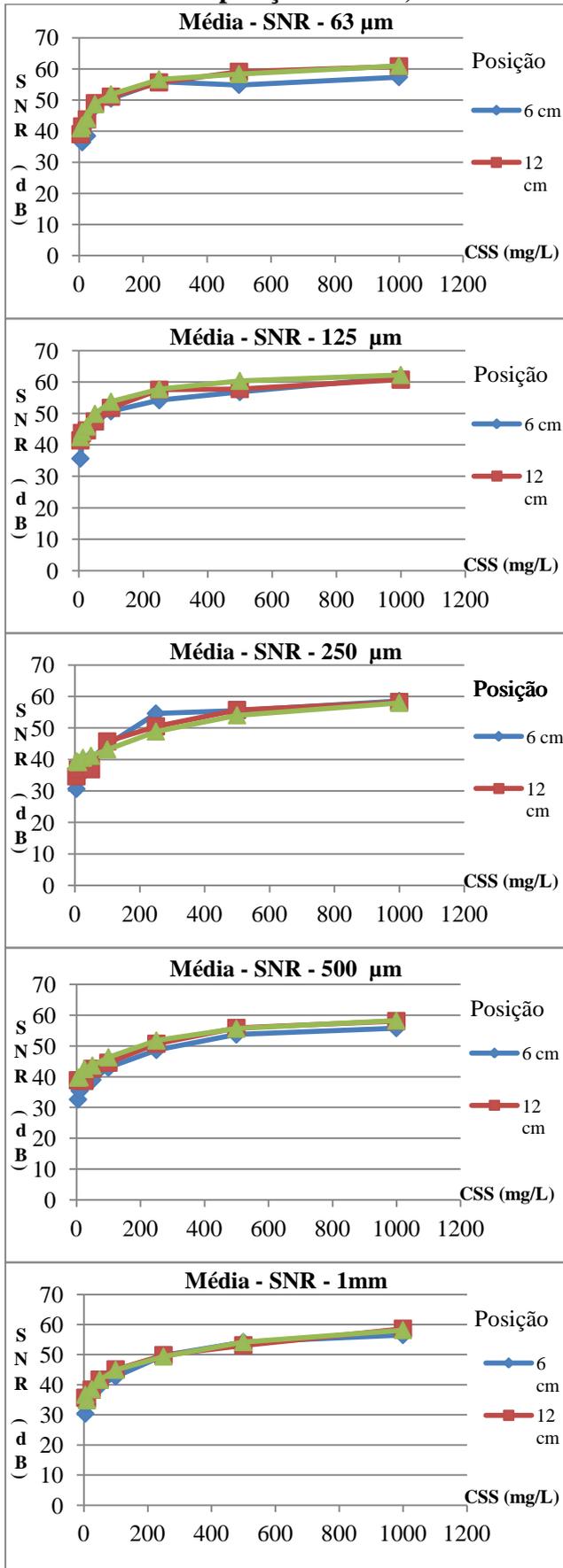
XAVIER, B. C.; SILVA, I. O.; GUIMARÃES, L. G.; GALLO, M. N.; RIBEIRO, C. P.; FIGUEIREDO Jr, A. G.; **Estudo experimental e numérico para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão por meio de sinais de espalhamento acústico**. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. Anais. Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 15 p.

APÊNDICES

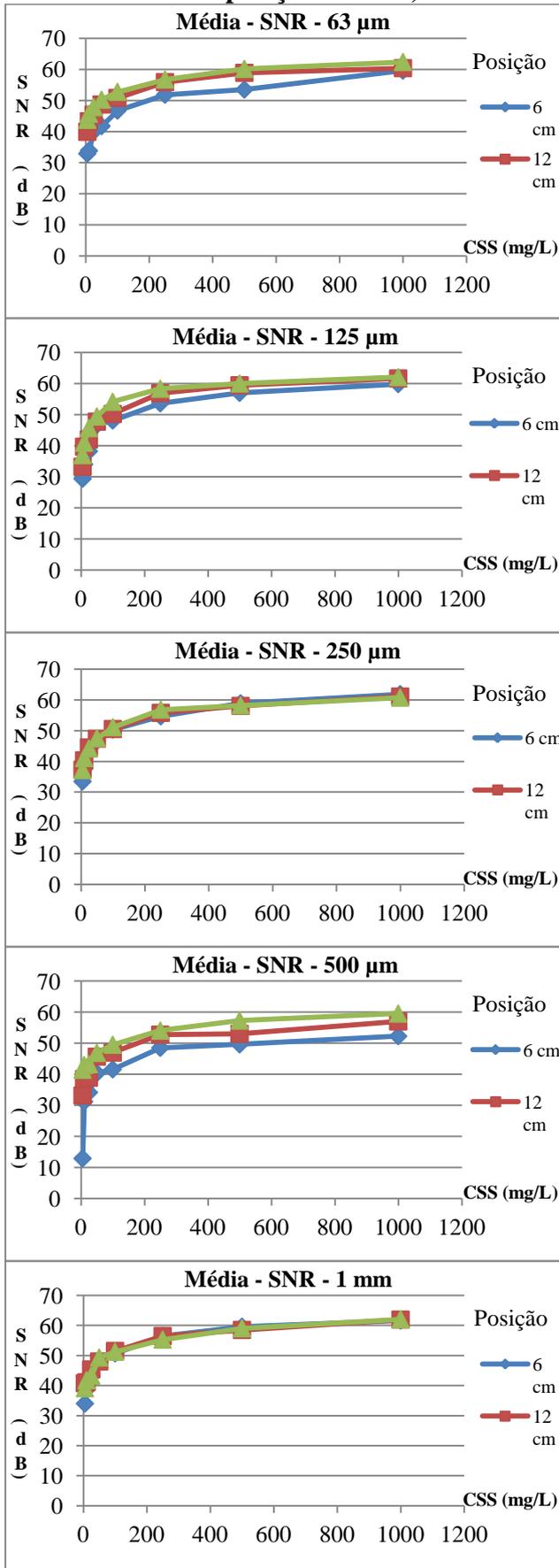
Apêndice A – Média dos três SNRs, frequência de 50 Hz, velocidade de 3 cm/s, solo 1, granulometria de 1 mm, CSS de 50 mg/L, tempo de homogeneização de 2 minutos e com o status do carregador ligado nos diferentes intervalos de coleta para as três posições: (a) 6 cm, (b) 12 cm e (c) 18 cm do fundo do recipiente.



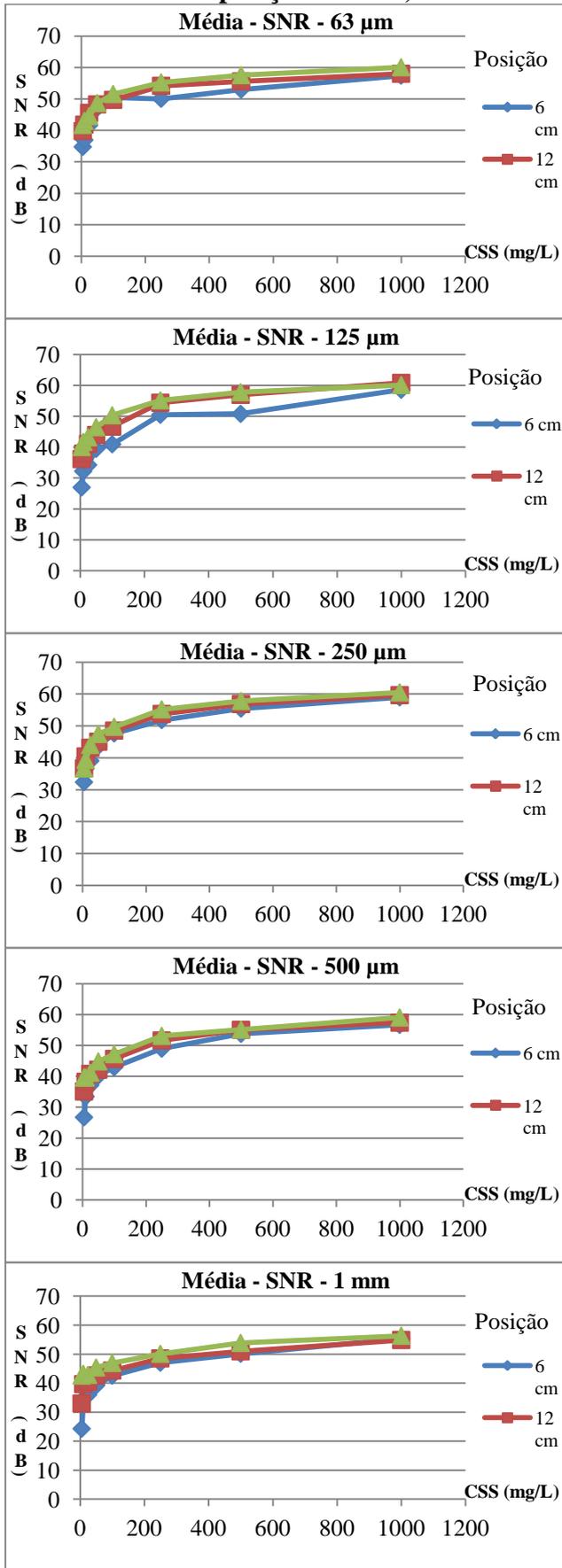
Apêndice B – Média do SNR filtrada (PSTM), solo 2 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.



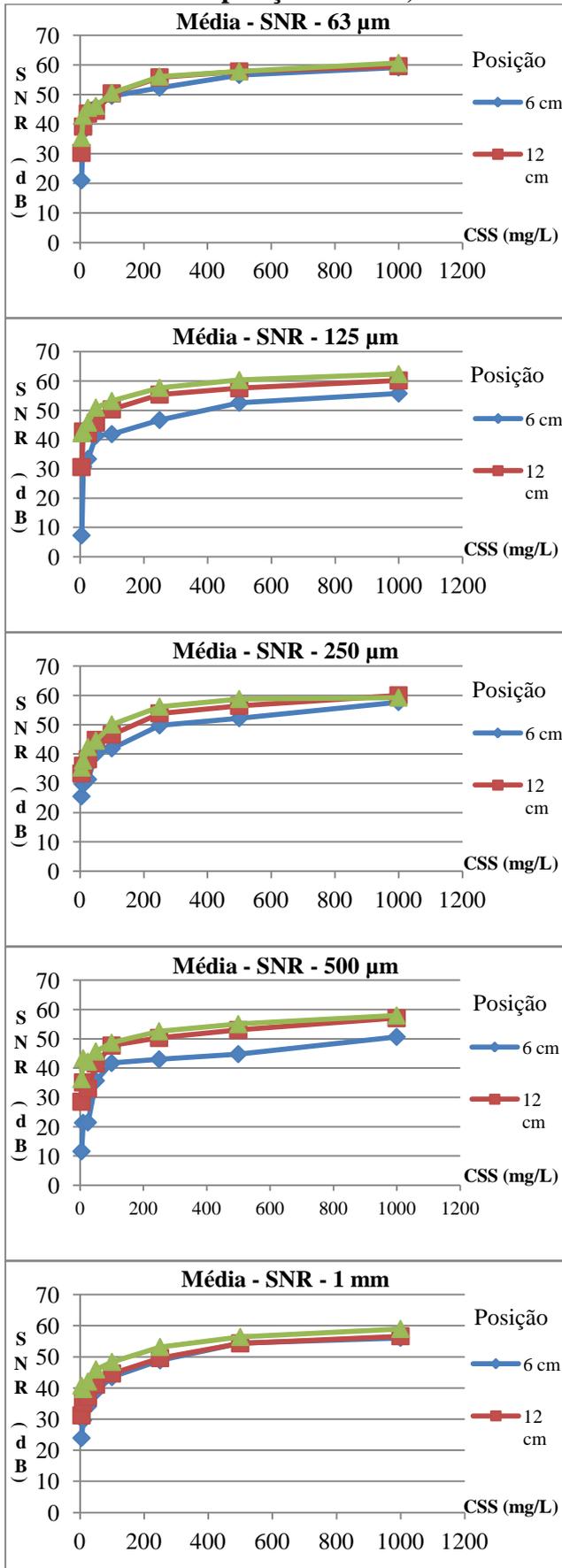
Apêndice C – Média do SNR filtrada (PSTM), solo 3 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.



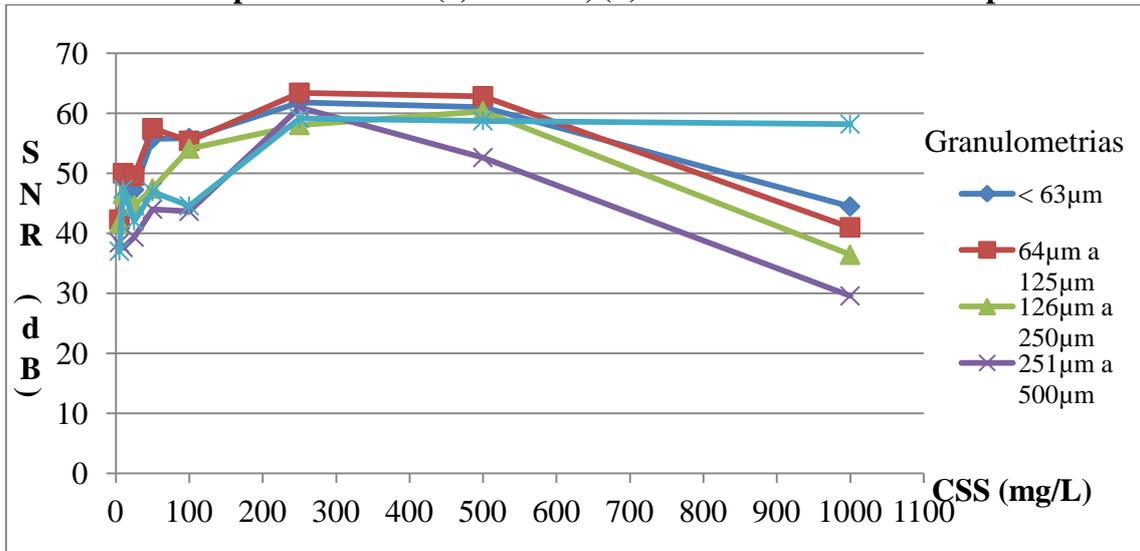
Apêndice D – Média do SNR filtrada (PSTM), solo 4 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.



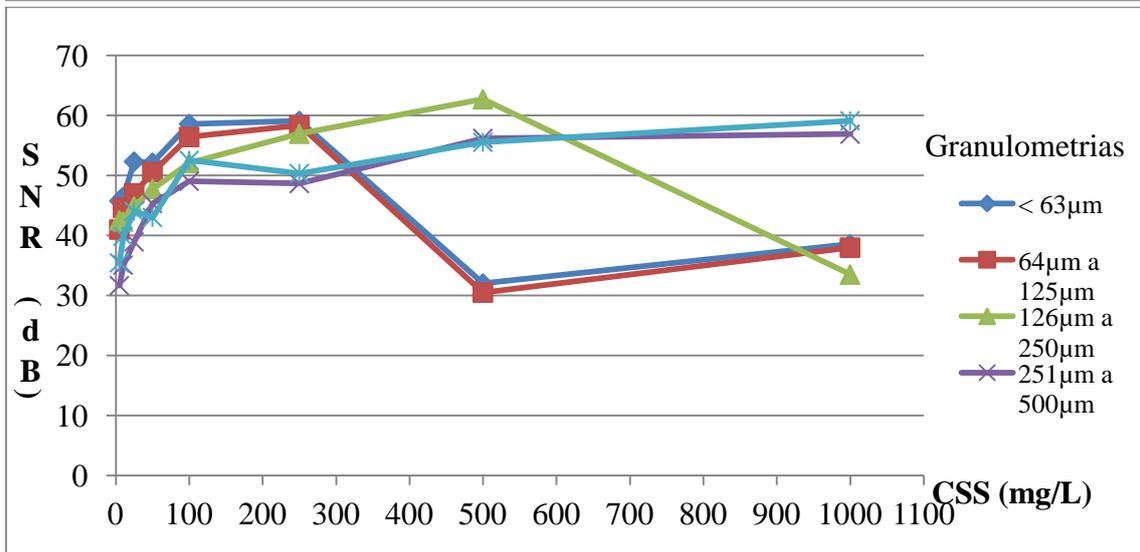
Apêndice E – Média do SNR filtrada (PSTM), solo 5 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.



Apêndice F – Média da granulometria do solo 1, filtrada (PSTM) para as duas posições respectivamente: (a) de 6 cm, (b) a 18 cm do fundo do recipiente.

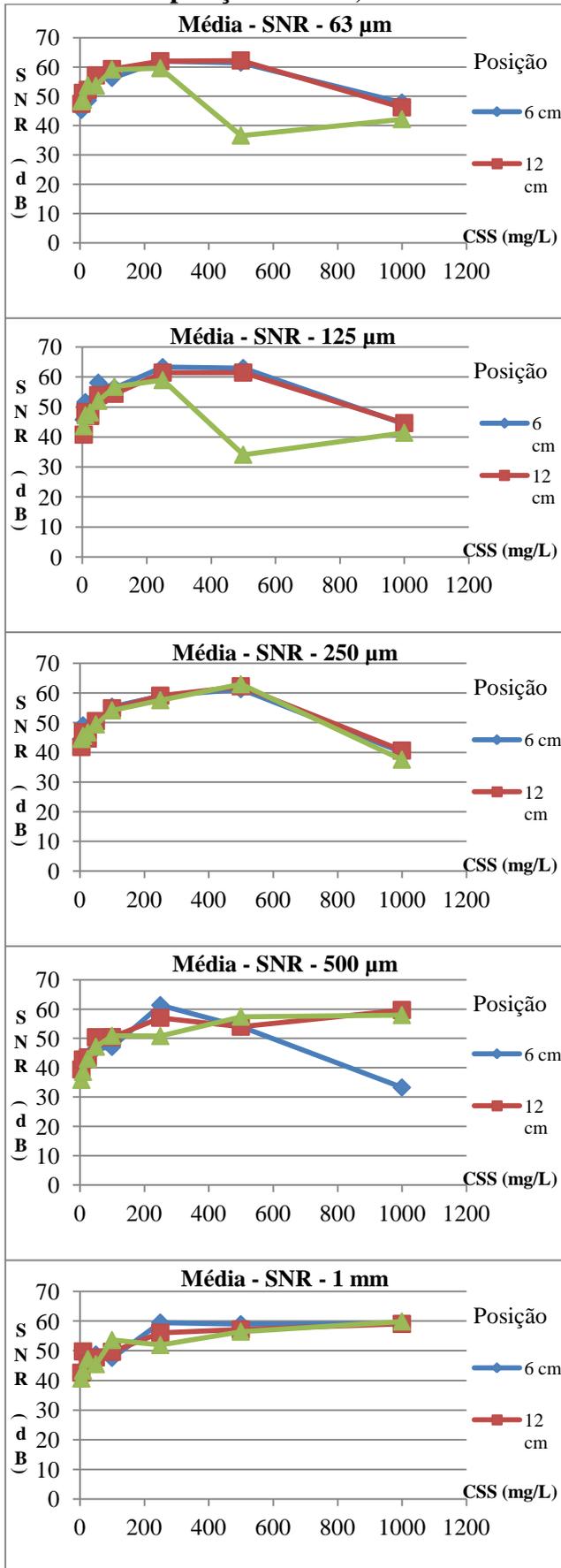


(a)

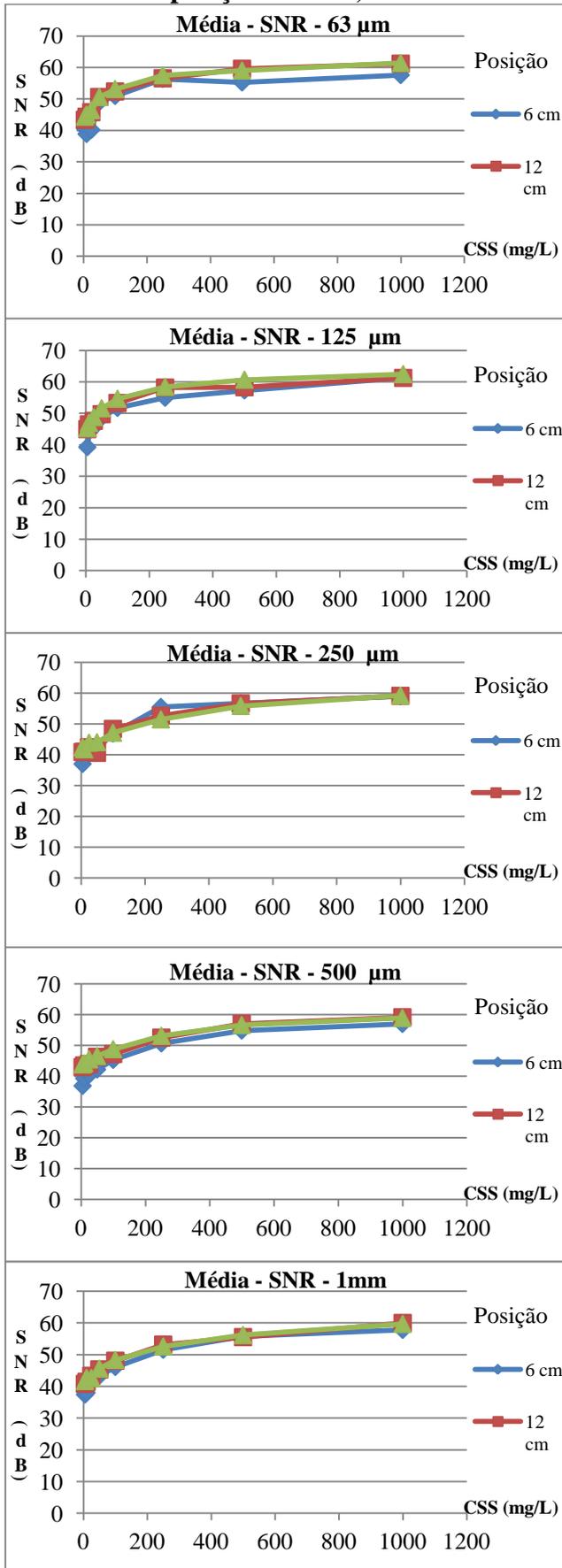


(b)

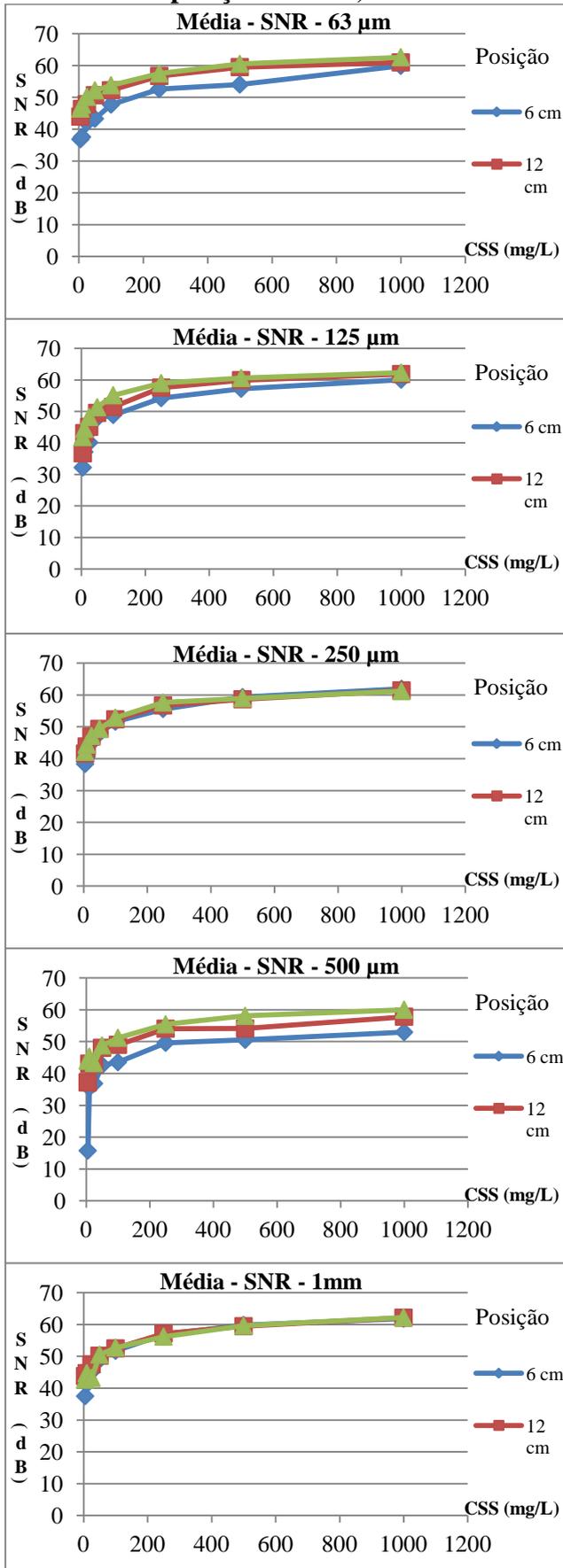
Apêndice G – Média do SNR não filtrado, solo 1 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.



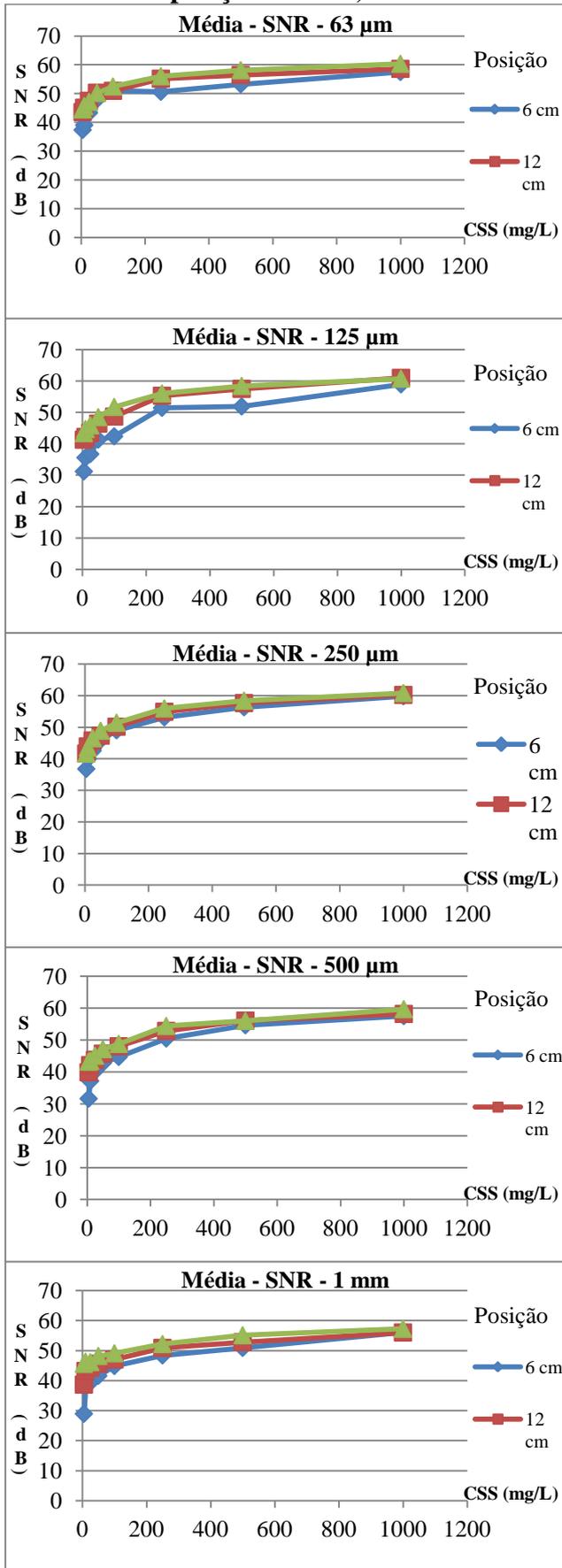
Apêndice H – Média do SNR não filtrado, solo 2 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.



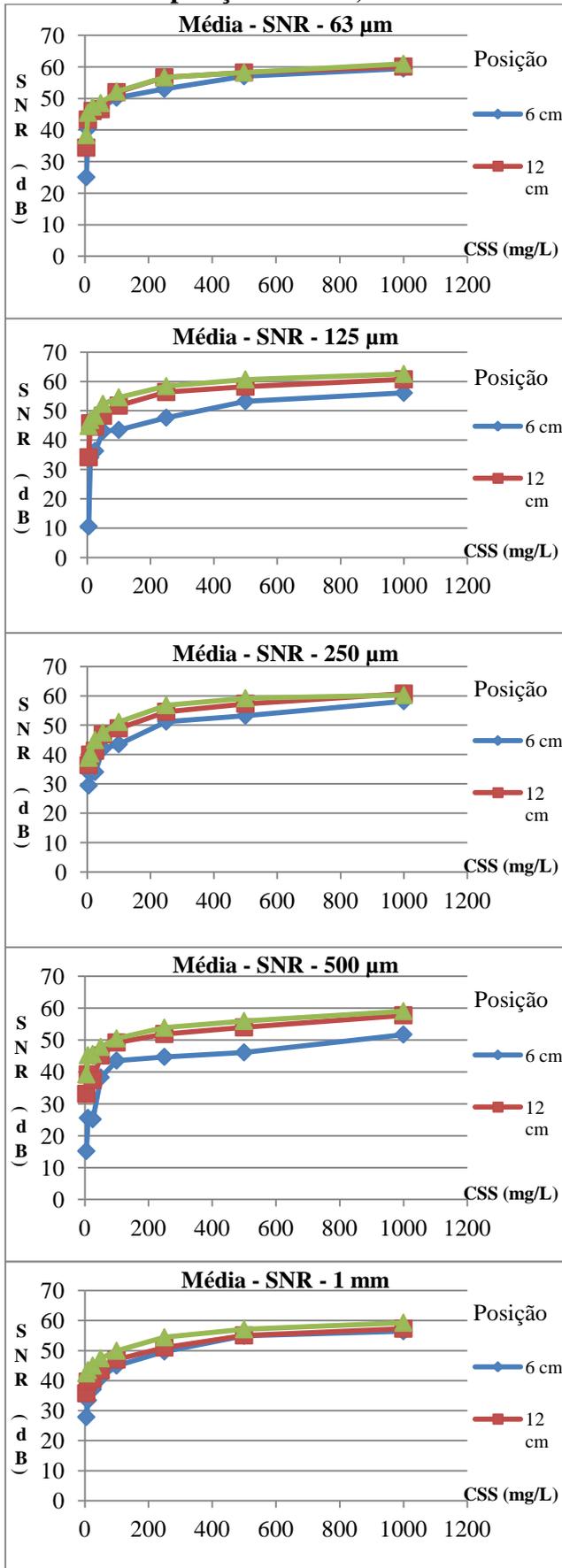
Apêndice I – Média do SNR não filtrado, solo 3 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.



Apêndice J – Média do SNR não filtrado, solo 4 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.



Apêndice K – Média do SNR não filtrado, solo 5 para as diferentes granulometrias nas posições a 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente.



Apêndice L – Média do SNR nas três posições (6 cm, 12 cm e 18 cm) não filtrado nos diferentes tipos de solos para as diferentes granulometrias.

