

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ROBERTO DUTRA DE FELICE

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE
TEXTURA DE SOLO COM SENSORES ÓPTICOS**

**Itaqui
2018**

ROBERTO DUTRA DE FELICE

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE
TEXTURA DE SOLO COM SENSORES ÓPTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Ciências Exatas da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Especialista em Ciências Exatas e Tecnologia.

Orientador: Nelson Mario Victoria Bariani

**Itaqui
2018**

ROBERTO DUTRA DE FELICE

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE
TEXTURA DE SOLO COM SENSORES ÓPTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Ciências Exatas da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Especialista em Ciências Exatas e Tecnologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: julho de 2018.
Banca examinadora:

Prof. Dr. Nelson Mario Victoria Bariani
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dra. Elisa Regina Cara
(UNIPAMPA)

Prof. Ms.C. Cristiano Galafassi
(UNIPAMPA)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Configurações ópticas de medição de dispersão.....	16
Figura 2. Turbidímetro desenvolvido para este trabalho.....	18
Figura 3. Sistema óptico desenvolvido constituído por fonte, LED vermelho, fototransistor, resistores, arduino nano e computador.....	20
Figura 4. Algoritmo da programação Scilab.....	21
Figura 5. Valores de absorvância calculados a partir do sinal detectado no sensor versus a variação do tamanho de partícula de solo que decanta em relação ao tempo com base na Lei de Stokes (amostra Olaria 1 solo).....	29
Figura 6. Valores de absorvância calculados a partir do sinal detectado no sensor versus a variação do tamanho de partícula de solo que decanta em relação ao tempo com base na Lei de Stokes (amostra Olaria 8 sedimento).....	30
Figura 7. Valores de absorvância calculados a partir do sinal detectado no sensor versus a variação do tamanho de partícula de solo que decanta em relação ao tempo com base na Lei de Stokes (UFSM2).....	32
Figura 8. Valores de absorvância calculados a partir do sinal detectado no sensor versus a variação do tamanho de partícula de solo que decanta em relação ao tempo com base na Lei de Stokes (amostra Precisão).....	33
Figura 9. Valores de absorvância calculados a partir do sinal detectado versus a variação do tamanho de partícula de solo que decanta em relação ao tempo com base na Lei de Stokes (amostra IBRA).....	33
Figura 10. Linha de tendência da absorvância quando o diâmetro da partícula e a concentração de sólidos suspensos tendem a zero, numa amostra de altas concentrações de argila e silte.....	34
Figura 11. Linha de tendência da absorvância quando o diâmetro da partícula e a concentração de sólidos suspensos tendem a zero, numa amostra de baixas concentrações de argila e silte.....	35
Figura 12. Linha de tendência da Absorvância quando o diâmetro da partícula e a concentração tendem a zero, amostra de baixas concentrações de argila e de silte.....	35
Figura 13. Linha de tendência da absorvância quando o diâmetro da partícula e a concentração de sólidos suspensos tendem a zero, numa amostra de muito alta concentração de argila e bastante silte.....	36
Figura 14. Linha de tendência da absorvância quando o diâmetro da partícula e a concentração de sólidos suspensos tendem a zero, numa amostra de muito baixas concentrações de argila e de silte.....	36
Figura 15. Curva de calibração obtida dos valores médios da absorvância da argila ao serem relacionados com as respectivas texturas.....	38
Figura 16. Curva de calibração obtida dos valores médios da absorvância do silte ao serem relacionados com as respectivas texturas.....	39

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Tempos de sedimentação para frações argila, silte e areia calculados pela Lei de Stokes para uma sedimentação de 5 cm de altura segundo programa Scilab da Figura 4.....28
- Tabela 2 – Valores médios da absorbância da argila e suas respectivas texturas.....38
- Tabela 3 – Valores médios da absorbância do silte e suas respectivas texturas.....38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Medição de sólidos suspensos.....	10
1.2. Medição da textura de solos e distribuição de tamanhos.....	12
1.2.1 Metodologias para obtenção da granulometria.....	13
1.2.1.1. Peneiração.....	13
1.2.1.2. Decantação ou sedimentação.....	13
1.3 Turbidimetria ou medição por atenuação óptica.....	14
1.4. Objetivos.....	17
1.4.1. Objetivo geral.....	17
1.4.2. Objetivos específicos.....	17
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
2.1. Sistema instrumental utilizado para determinação de textura.....	17
2.2. Cálculo dos tempos limites das classes texturais.....	20
2.3. Processamento das medições do sistema sensor.....	21
2.4. Relações matemáticas no sistema de medição.....	23
2.4.1. Relações temporais.....	23
2.4.2. Parâmetros de calibração - Valor Médio.....	24
2.4.3. Extrapolação da absorvância ao intervalo da argila.....	26
2.4.4. Obtenção dos parâmetros da curva Abs(D) para calibração.....	26
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
3.1. Tempos de sedimentação.....	28
3.2. Curvas de absorvância em função do diâmetro.....	28

3.3. Linha de tendência e extrapolação na região da argila.....	34
3.4. Valores médios da absorvância da argila e do silte.....	37
4. CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS.....	41

RESUMO

A medição da concentração e granulometria de sólidos suspensos em meio líquido tem importância em física do solo e agronomia para a determinação da textura do solo, que é uma característica importante no manejo dos solos, pois influencia o grau de coesão e adesão entre as partículas constituintes. Os teores relativos de argila, silte e areia contidos no solo e indicados na textura influenciam na taxa de infiltração e retenção de água, na aeração e na disponibilidade de nutrientes. Nas últimas décadas, a utilização de sensores ópticos como forma indireta de determinação da Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS) tem ganhado destaque nos programas de monitoramento do transporte de sedimentos suspensos em rios. No entanto, aplicações da metodologia na determinação da textura de solos não foram encontrados na literatura. O presente trabalho tem por objetivo calibrar um sistema óptico simples de diodo e fotodiodo, em configuração turbidimétrica, para a obtenção de textura de solos. A metodologia está baseada na aplicação da Lei de Stokes para um sistema contendo uma concentração conhecida do solo a ser analisado em suspensão em um tubo. Os resultados mostram que a absorvância média da argila e a absorvância média do silte obtidas com o dispositivo óptico tiveram uma correlação com as texturas do solo determinadas pelo método tradicional aplicado em laboratórios de solo que consiste em peneiramento e medição da densidade do conteúdo de argila suspenso.

Palavras-Chave: turbidez, calibração de sensores ópticos, concentração de sedimentos suspensos, textura do solo; técnicas espectroscópicas; Lei de Beer-Lambert; Lei de Stokes.

ABSTRACT

The measurement of the concentration and granulometry of suspended solids in liquid medium has importance in soil physics and agronomy for soil texture determination, which is an important characteristic in soil management, as it influences the degree of cohesion and adhesion between the constituent particles. The relative levels of clay, silt and sand contained in the soil and indicated in the texture influence the rate of infiltration and water retention, aeration and nutrient availability. In the last decades, the use of optical sensors as an indirect way of determining the Suspended Sediment Concentration (SSC) has been highlighted in the monitoring programs of sediment transport suspended in rivers. However, applications of the methodology in soil texture determination were not found in the literature. The present work aims to calibrate a simple optical system of diode and photodiode, in turbidimetric configuration, to obtain soil texture. The methodology is based on the application of Stokes's Law to a system containing a known concentration of the soil to be analyzed in suspension in a tube. The results show that the average clay absorbance and the average silt absorbance obtained with the optical device had a correlation with the soil textures determined by the traditional method applied in soil laboratories, which consists of sieving and measuring the density of the clay content suspended.

Keywords: turbidity, calibration of optical sensors, concentration of suspended sediment. soil texture, spectroscopic techniques, Beer-Lambert Law; Stokes's Law.

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE TEXTURA DE SOLO COM SENSORES ÓPTICOS

Roberto Dutra de Felice
Nelson Mario Victoria Bariani
Cassiane Jayj de Melo Victoria Bariani

1. INTRODUÇÃO

1.1. Medição de sólidos suspensos

A medição de sólidos suspensos em meio líquido, fundamentalmente em água, tem importância em várias áreas do conhecimento: física do solo e agronomia na determinação da textura do solo (FERRARESI et al., 2012), hidrologia e aquicultura na determinação de sedimentos suspensos em cursos de água superficiais (BRINKER e RÖSCH, 2004), limnologia na determinação da qualidade da água (RÜGNER et al., 2013), ciência dos alimentos na determinação de turbidez em produtos alimentícios líquidos (MONGIA e ZIEGLER, 2009), entre outros.

Com relação ao monitoramento do transporte de sedimentos suspensos em rios, os avanços ocorridos nas últimas décadas, em termos de tecnologias substitutas, apresentam alternativas promissoras na suplantação dos métodos tradicionais de coleta de sedimentos e análise em laboratório, pela implantação de sistemas de monitoramento *in situ* que resultam serem eficientes operacionalmente. Entre essas tecnologias, destacam-se os sensores ópticos, a reflexão acústica, a difração a laser, a diferença de pressão e as análises de imagens digitais (SARI et al., 2015). Estes avanços ainda continuam em desenvolvimento, e suas aplicações em outras áreas, por exemplo na agricultura, são pouco frequentes.

De maneira geral, na determinação de sólidos suspensos por meios ópticos, a turbidez tem sido a variável física escolhida para a padronização das medições nos diferentes tipos e configurações de equipamentos. O *National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data* inclui a abordagem revisada para medição e relatório de turbidez que foi implementado pelo *United States Geological Survey* (USGS, 2018) para dar conta dos avanços tecnológicos e consequentes complexidades de medição mediante utilização de sensores ópticos (turbidímetros) em programas de monitoramento de sedimentos suspensos.

Diversos estudos demonstram a estreita relação existente entre a turbidez e a Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS) (HAIMAN et al., 2014; HARRINGTON e HARRINGTON, 2013; SHELLENBARGER et al., 2013; TANANAEV e DEBOLSKIY, 2014), possibilitando o uso dessa variável como medida indireta da CSS. No entanto, a transformação das leituras de turbidez em valores de CSS não é simples e, por isso, apesar dessa tecnologia substituta ser considerada uma técnica madura, bem difundida e relativamente bem documentada (GRAY and GARTNER, 2009; KUHNLE and WREN, 2003); a incerteza associada ao uso dessa variável é ainda elevada (HUDSON, 2001; PRUIT, 2002).

Elementos motivadores do uso das técnicas fotométricas podem ser encontrados com certa facilidade para a montagem de configurações de baixo custo e que podem ser facilmente adaptadas para uso a campo ou em sistemas automáticos. Vários trabalhos descrevem a construção de instrumentos de baixo custo onde foram usados sensores ópticos acoplados a uma plataforma Arduino ou similar (MOREIRA, 2016; WIRANTO et al., 2016; KELLEY et al., 2014; SENDRA et al., 2013) ou plataformas gerais para qualquer sensor (MNATI, et al., 2017).

Os sistemas ópticos geralmente se baseiam na relação entre a resposta (S) de um fotosensor quando a amostra considerada intercepta um feixe de luz e a resposta do sensor com o meio suporte puro (S_0), por exemplo água destilada. O logaritmo da relação (S_0/S), em valor absoluto, chamado de absorvância ($A = \log S_0/S$) é a variável que mantém uma relação funcional monótona com a turbidez e com as concentrações de substâncias que dispersam a luz. Esta relação pode ser linear para concentrações relativamente baixas de substâncias, no alcance de aplicação da chamada Lei de Beer-Lambert. A absorvância pode posteriormente ser calibrada para indicar valores de outra variável, como turbidez ou concentração de substâncias, seja em solução ou suspensas (HUDSON, 2001).

No entanto o uso sistemático de sistemas ópticos demanda a atenção sobre um número considerável de variáveis envolvidas no processo de medição. Os resultados obtidos na conversão da turbidez ou variáveis ópticas para a CSS são dependentes de: a) os instrumentos utilizados; b) a calibração dos instrumentos; c) a manipulação das amostras utilizadas na calibração e; d) como, quando e onde as amostras foram coletadas (PRUIT, 2002). Portanto, a

construção de uma relação precisa entre o sinal registrado por um sensor óptico e a CSS está fortemente ligada a uma adequada calibração entre a resposta do sensor e a CSS, sendo essa resposta influenciada por fatores oriundos do sedimento, referentes ao instrumento de monitoramento e relacionados à qualidade da água e ao fluxo no canal (SARI et al., 2015).

Pelo exposto, observa-se que existem pesquisas em andamento e marcado interesse no desenvolvimento de sistemas baseados em sensores ópticos para medição de características de sedimentos e solos. Este tipo de trabalho vem sendo desenvolvido no Laboratório Interdisciplinar Integrado da Unipampa Campus Itaquí, em atividades que unem o ensino, a pesquisa e a extensão de forma fértil e criativa, aproveitando o esforço e concentração exigido no ensino para analisar assuntos de interesse científico atual e de aplicação prática no cotidiano regional. Em particular, no presente trabalho, procura-se a aplicação de sistemas ópticos de medição na física de solos e agricultura.

1.2. Medição da textura de solos e distribuição de tamanhos

A textura dos solos é uma medida da distribuição de tamanhos das partículas minerais constituintes do solo, a qual é usada para classificação dos solos em classes, feita em 3 intervalos: argila ($< 2 \mu\text{m}$), silte (2 a $50 \mu\text{m}$) e areia (50 a $2000 \mu\text{m}$). Quando estes materiais entram em suspensão aquosa, como por exemplo, durante o escoamento superficial da água de chuva, inicia-se um processo de transporte e sedimentação cujas características dependem da distribuição de tamanhos das partículas (KLEIN, 2014).

Utilizando subintervalos dentro de cada classe, podemos ter uma distribuição muito mais representativa dos tamanhos das partículas de solos presentes na amostra, que é chamada de curva granulométrica (SILVA et al., 2004). Mas a textura permite uma visão simplificada da distribuição, conveniente para aplicações técnicas na agricultura.

A textura é uma característica importante no manejo dos solos, pois determina, em grande parte, o grau de coesão e adesão entre as partículas do solo. Os teores relativos das partículas do solo influenciam na taxa de infiltração e retenção de água, na aeração e na disponibilidade de nutrientes (FERRARESI et al., 2012; KLEIN, 2014).

A textura dos solos tem sido determinada através de métodos analíticos largamente consolidados (EMBRAPA, 1997), utilizados nas redes de laboratórios de análises de solos,

tais como ROLAS – Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo, mas que demandam de instalações, recursos e tempo consideráveis para sua realização (RUIZ, 2005; CANIZELLA et al., 2014).

1.2.1 Metodologias para obtenção da granulometria

A obtenção de distribuições mais detalhadas de tamanho de partículas de solo é geralmente realizada por métodos físicos tais como peneiração e decantação, ou ópticos (difração de raios X, dispersão de laser) (RUIZ, 2005). O presente trabalho investiga a utilização de um sistema combinado baseado na decantação do solo suspenso em água destilada, e a medição das variações dos registros de um fotosensor de um sistema óptico que monitora a variação da absorbância ao longo do tempo.

1.2.1.1. Peneiração: o material seco ou em suspensão é passado por peneiras de diferentes tamanhos, separando as frações. A peneira com menor diâmetro utilizada para solos é de 0,075 mm (ABNT, 1984), sendo então um pouco maior que o limite de tamanho considerado para silte (0,050 mm). A partir desse limite de peneiração podemos então aplicar a técnica de sedimentação, pois a decantação será gradativamente mais lenta, o que facilita a detecção de mudanças de turbidez.

1.2.1.2. Decantação ou sedimentação

A Lei de Stokes, deduzida em 1851 por George Gabriel Stokes, aplicando as leis da dinâmica de Newton, relaciona a velocidade de deposição de uma partícula dentro de um fluido com o diâmetro da mesma. A lei se aplica para partículas menores a 0,10 mm = 100 micrômetros, em condições de baixa turbulência do fluido e considerando-as com o formato de esferas. Os diâmetros de aplicação da lei incluem completamente as classes de argila e silte, e a fração mais fina da areia. As limitações e extensões da lei são discutidos em numerosos artigos, tais como o de Salomone et al. (2018), com valioso enfoque didático.

Em termos práticos podemos considerar que a velocidade de sedimentação das partículas, em condições ideais, está vinculada com o tamanho das mesmas (diâmetro aparente) através de uma constante; para velocidade em m/s e diâmetro em mm, $K=0,8887$:

$$V_s = K \cdot D^2 \quad (1)$$

A velocidade de deposição (velocidade de queda) da Lei de Stokes surge do balanço dinâmico de esferas caindo num fluido (SALOMONE et. al., 2018). Como resultado obtemos a expressão:

$$V_s = D^2 \cdot (\gamma_s - \gamma) / (18 \cdot \mu) \quad (2)$$

onde intervêm os seguintes conceitos:

V_s = velocidade de deposição (m/s);

D = diâmetro equivalente da esfera (partícula) em metros;

γ = peso específico da água a 20° C = 9792,34 N/m³;

γ_s = peso específico da partícula do sólido (quartzo) = 25949,701 N/m³

γ_s/γ = 2,65 (densidade relativa do quartzo em relação a água);

μ = viscosidade dinâmica da água a 20° C = 0,00101 N*s/m²;

ρ = massa específica da água a 20° C = 998,2 kg/m³;

η = viscosidade cinemática da água a 20° C = 0,00000101 m²/s;

$\gamma = \rho \cdot g$; $\eta = \mu/\rho$;

Mediante a Lei de Stokes, podem ser calculados os tempos de sedimentação, para cada diâmetro de partícula, correspondentes a uma determinada altura de queda (Lencastre, 1983).

1.3 Turbidimetria ou medição por atenuação óptica

Turbidimetria é uma técnica analítica de espectroscopia baseada na dispersão da radiação de uma solução que contém partículas suspensas. De maneira mais simples, um feixe de luz passa através de um fluido contendo partículas sólidas suspensas, interagindo com elas. Essas partículas absorvem a luz e a dispersam em todas as direções, dando uma aparência turva à mistura. A diminuição da radiação que passa através do meio é a base para a medida turbidimétrica.

A análise turbidimétrica é feita através da medida da atenuação, causada pela dispersão, da intensidade da radiação incidente. Quando um feixe de radiação de intensidade

I_0 atravessa um meio que o dispersa, sem absorvê-lo, a intensidade transmitida I é dada pela expressão:

$$I = I_0 e^{-\tau \cdot b} \quad (3)$$

onde τ é a turbidez, ou coeficiente de turbidez, “e” = 2,718 é a base dos logaritmos naturais, e “b” é o tamanho do caminho óptico atravessado pelo feixe. De forma mais geral, pode ser utilizada a variável absorbância (A):

$$A = \log(1/T) \quad (4)$$

onde T é a transmitância obtida por:

$$T = I/I_0 \quad (5)$$

Uma discussão moderna e geral sobre o uso da absorbância em sistemas de vários componentes pode ser achada em Martens et al. (2003).

O coeficiente de turbidez τ ou a absorbância mantém uma relação funcional linear com a concentração das partículas suspensas no meio em condições de baixas concentrações e pouca interferência entre as partículas, o que é a base da lei de Lambert-Beer (HARRIS, 2005). Porém, em condições de alta concentração, são esperados afastamentos que levam a outro tipo de relações funcionais entre absorbância e CSS, como discutido em Martens et al. (2003). Estas relações funcionais podem ser achadas de forma empírica, como será explicado na seção de metodologia.

A medição do efeito da dispersão da luz que chega a sensores ópticos pode ser realizada em três configurações diferentes: turbidimétrica (sensor a 180° em relação a fonte luminosa), nefelométrica (sensor a 90° em relação a fonte luminosa) e backscattering (sensor a 0° em relação a fonte luminosa). A diferença entre a turbidimetria e a nefelometria é que esta última se baseia na medida da dispersão da radiação, geralmente a um ângulo de 90° do feixe incidente, enquanto que na turbidimetria o detector é posicionado a 180° do feixe incidente, conforme a Figura 1. A escolha entre a turbidimetria e a nefelometria está baseada na fração da radiação dispersada. Quando a dispersão é intensa devido à presença massiva de partículas suspensas - que é o caso aqui estudado - a turbidimetria gera resultados mais confiáveis. Já a nefelometria é aconselhada para baixas concentrações, porque uma pequena

intensidade de radiação dispersada contra um fundo negro é mais fácil de medir do que uma pequena mudança na intensidade da radiação incidente (MORAIS et al., 2006).

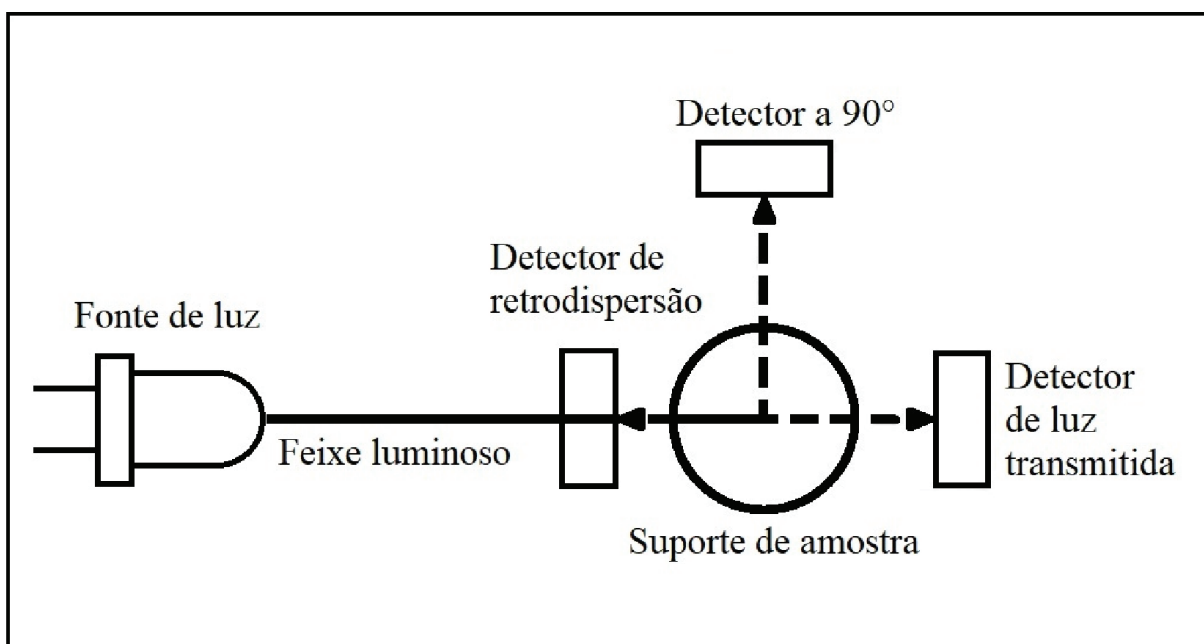


Figura 1 – Configurações ópticas de medição de dispersão

Alguns trabalhos já buscaram descrever os principais fatores que interferem na resposta de sensores ópticos OBS (Optical Backscattering Sensor) e transmissômetros, como Bunt et al. (1999), que apresenta uma revisão sobre os sensores ópticos OBS e transmissômetros, expondo os fatores que influenciam a resposta de tais instrumentos, assim como Downing (2006), que descreve os fatores que influenciam a resposta de sensores ópticos OBS.

Segundo Sari et al. (2015), observa-se que apesar do uso das tecnologias ópticas para análise de sedimentos suspensos ter crescido (internacionalmente) nas últimas décadas, seu potencial é ainda pouco explorado no Brasil. No mesmo trabalho, realizam uma revisão detalhada para analisar como diferentes fatores influenciam o processo de calibração de vários tipos de sensores ópticos, também discutem a situação da aplicação dessa tecnologia para monitoramento de sedimentos em rios brasileiros. Nessa importante revisão, as variáveis identificadas que afetam a resposta de um sensor óptico em ordem de importância são: 1) a CSS (variação até 1000 vezes), 2) o tamanho da partícula (até 100 vezes), 3) a forma e a rugosidade da partícula, 4) a cor e a composição mineralógica da partícula de sedimento

transportado, 5) as características ópticas e geométricas do sensor de monitoramento, 6) a presença de bolhas, gases e outros componentes na coluna de água, e 7) os processos de floculação, agregação e turbulência.

1.4. Objetivos

Em consonância com os conceitos e interesses expostos, traçam-se os seguintes objetivos:

1.4.1. Objetivo geral

Implementar um sistema óptico simples de baixo custo e a metodologia para medir a absorvância de amostras de solos em suspensão em função do tempo, visando obter correlações com a textura do solo (porcentagem de argila, silte e areia).

1.4.2. Objetivos específicos

- 1) Escolher a fonte e sensor de luz e a configuração do circuito elétrico.
- 2) Identificar as variáveis físicas mensuráveis a serem relacionadas com a textura.
- 3) Implementar a medição em função do tempo do sinal do sensor.
- 4) Desenvolver um procedimento de calibração para obtenção da textura em função da variável física escolhida.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Como o presente trabalho baseia-se no desenvolvimento de um sistema de medição, incluindo os aspectos instrumentais e de cálculo, apresenta-se, logo a seguir, o conjunto de dispositivos instrumentais e procedimentos que constituem o sistema.

2.1. Sistema instrumental utilizado para determinação de textura

Ao longo do trabalho foram testadas várias configurações e dispositivos ópticos para monitorar o processo de decantação de amostras de solos, com fins de determinação da textura dos mesmos, que não serão descritas em este artigo. Finalmente foi escolhido, usando como critério a boa sensibilidade para detectar diferenças em textura, o sistema que será descrito a continuação.

O sistema escolhido pode ser caracterizado como fotométrico turbidimétrico com capacidade de medir a radiação transmitida ou dispersada frontalmente pela amostra, proveniente da fonte. Consta de uma fonte de luz LED de cor vermelha, escolhida por apresentar o máximo de resposta com relação ao detector (fototransistor) disponível. Estes

dispositivos foram colocados alinhados com a seção transversal do tubo da amostra, formando ângulo de 90° com relação ao eixo do tubo (Figura 1). Na posição do tubo foi adaptado um suporte para tubos cilíndricos de vidro com 10 mm de diâmetro interno. Foi utilizada uma fonte de alimentação de aproximadamente 5 Volts, por apresentar uma voltagem compatível com a de circuitos digitais que usam a conexão USB, como o computador ou a placa Arduino, descrita no próximo parágrafo. Os circuitos do LED e do fototransistor (este inversamente polarizado para aumentar a sensibilidade ao feixe de luz) utilizados, esquematizado na Figura 2, incluíram um resistor em série para cada um, de valor próximo a 300 ohms e 10 kohms, respectivamente, para reduzir a voltagem até o potencial de operação e controlar a intensidade de corrente dentro de valores seguros.

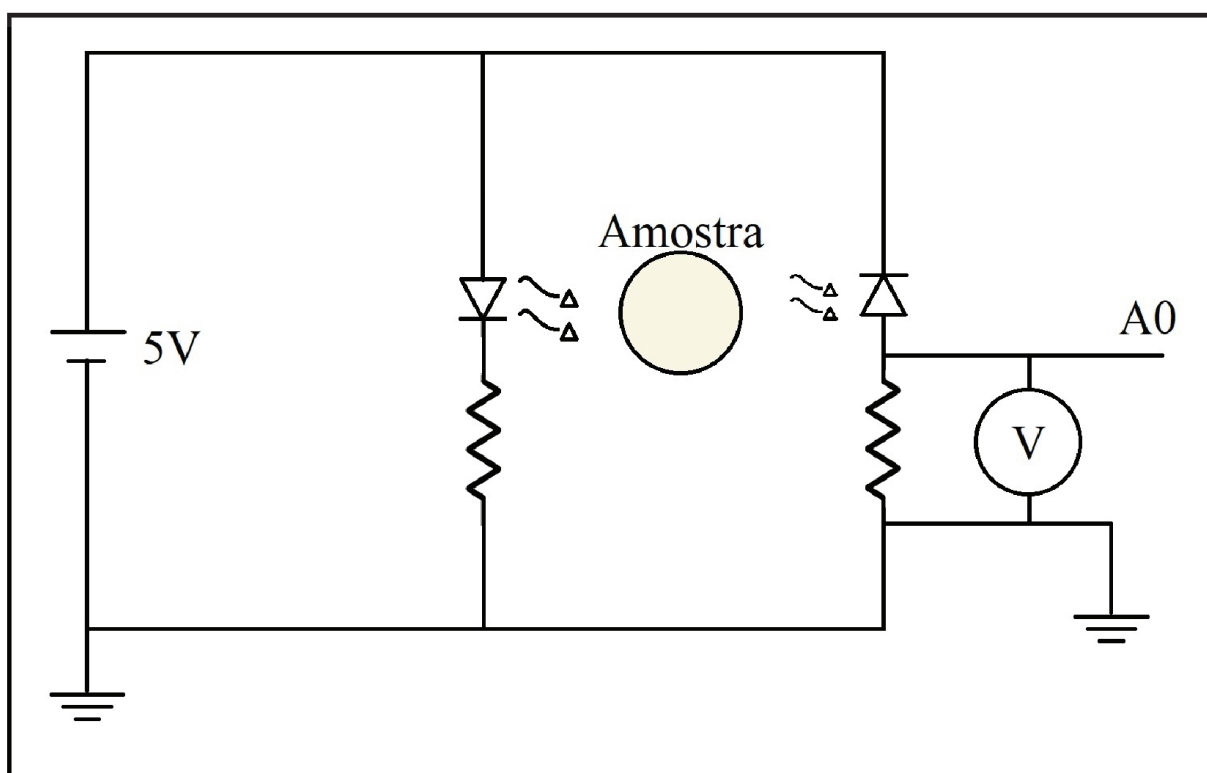


Figura 2 – Diagrama elétrico do sistema óptico desenvolvido para este trabalho

O Arduino é um microcontrolador que possui entradas e saídas para sinais analógicos e digitais, um microprocessador que pode ser programado e uma conexão serial que serve tanto para alimentação do circuito como para comunicação com o computador ou outros dispositivos. Uma descrição mais detalhada do Arduino pode ser encontrada em Wiranto et al. (2016). Durante este trabalho foi utilizada, basicamente, a entrada analógica A0 (Figura 2) e a

conexão de terra (Gnd) correspondente, assim como um algoritmo simples de leitura da entrada e comunicação serial com o computador ou cartão de memória para registro dos dados, programado no software Arduino.

A voltagem medida no resistor do fotosensor foi enviada para a entrada analógica A0 de uma placa Arduino Nano de 10 bits, programada para salvar os valores do sensor numa escala de 0 a 1023 em cartão de memória SD ou diretamente no computador, em intervalos de tempo suficientes para garantir a presença de silte e argila no caminho óptico.

Para fins de verificação dos resultados do sistema instrumental, foi também utilizado um multímetro digital comercial com datalogger, realizando medições simultâneas ou alternativas, calibradas em volts, para comparação.

As medições foram programadas tipicamente para serem realizadas cada 1 segundo, podendo ser definido um intervalo menor ou maior dependendo da variabilidade do sensor na região sob estudo. Como resultado foi criada a tabela e a respectiva curva do número digital do sensor e a voltagem em função do tempo para cada amostra.

Todas as amostras utilizadas tinham textura conhecida, cujo valor foi utilizado para calibração do sistema instrumental. Foram escolhidas cinco amostras - de textura previamente determinada pelo método tradicional (RUIZ, 2005). Antes de realizar a medição, as partículas de solo foram secas, trituradas em moinho, e passadas em peneira de 2 mm. Uma quantidade adequada, próxima a 160 mg de solo foi utilizada para criar suspensões com concentração próxima a 20 g/litro. Foram usados tubos com tampa e capacidade de 8 ml, para facilitar a agitação manual ou com agitador mecânico de contato durante 3 minutos, como método de dispersão. Cada amostra foi denominada conforme sua origem: Olaria 1 e Olaria 8 se refere a 2 pontos de amostragem pertencentes ao arroio situado no limite oeste da cidade de Itaqui, RS, Brasil; UFSM é uma amostra cedida pelo laboratório de análise de solos da respectiva universidade; IBRA e Precisão são padrões cedidos por um laboratório de Análise de solos cadastrado na Rede Oficial de Laboratórios de Análises de Solos. Uma visão fotográfica do sistema se encontra na Figura 3.

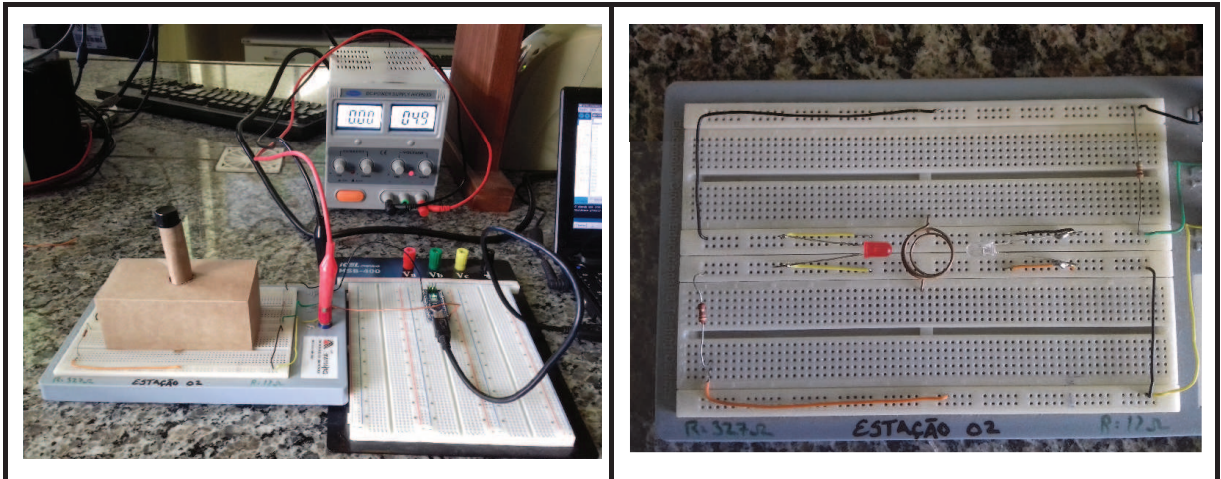


Figura 3. Sistema óptico desenvolvido constituído por fonte, LED vermelho, fototransistor, resistores, arduino nano e computador

2.2. Cálculo dos tempos limites das classes texturais.

Considerando os tamanhos limites das classes texturais adaptados de Wentworth (1922), para areia (2000-50 μm), silte (50 - 2 μm) e argila (<2 μm), foram calculados os tempos de sedimentação, que indicam quando inicia e quando termina a sedimentação para cada classe textural, assumindo a validade da lei de Stokes. Estes tempos limites servem para o planejamento do experimento, fornecendo dados úteis para a decisão sobre o tempo de aquisição de dados experimentais.

Na linguagem Scilab (SCILAB ENTERPRISES, 2012), este cálculo poderia ser feito como indicado na Figura 4, considerando valores típicos da configuração instrumental usada. Este software é mencionado pois ele permite, inclusive, a conexão direta com o sistema Arduino, sendo uma opção para aquisição de dados e posterior processamento. Resultados da aplicação do programa serão apresentados e discutidos posteriormente, na Tabela 1.


```

//LEI DE STOKES SEDIMENTAÇÃO

h=5e-2           //altura da queda em m
visc=0.001       //viscosidade da água Nsm^-2
g=9.8           //gravidade em m/s^2
dsolo=2650       //densidade do solo kg/m^3
dagua=1000       //densidade da água kg/m^3
//intervalos de classes textuais
d_areia_max=2e-3 //metros = 2000 micrometros
d_areia_min=5e-5 //metros = 50 micrometros
d_silte_max=d_areia_min
d_silte_min=2e-6 //metros = 2 micrometros
d_argila_max=d_silte_min
d_argila_min=1e-6 //metros = 1 micrometro

//Cálculo de tempos de sedimentação das frações
d_limites=[d_areia_max,d_areia_min,d_silte_min,d_argila_min]; //metros
t_limites=18*visc*h./(d_limites.^2*g*(dsolo-dagua)) //segundos
t_horas= t_limites/3600 // horas

```

Figura 4 – Algoritmo da programação Scilab

2.3. Processamento das medições do sistema sensor

Foi denominado S o valor de saída do sistema de medição; S_A = saída do Arduino; S_V =saída do multímetro digital; S_0 = saída para amostra de água destilada pura, tanto no Arduino como no multímetro digital. Assim:

$$S_0 < 1023, \text{ no arduino e } S_0 < 5 \text{ V, no multímetro, } 0 < S_A < 1023 \text{ e } 0 < S_V < 5 \text{ V}$$

O sinal (S) será proporcional à intensidade luminosa (I) que atinge o fotosensor, com a constante de proporcionalidade (k) sendo a mesma para a amostra e para a água destilada de referência, tanto no sistema com base em Arduino quanto no sistema com multímetro. É possível verificar que a constante que vincula a leitura do sistema de medição com a intensidade da luz não precisa ser conhecida, pois é cancelada na comparação com a medição na água destilada, conforme apresentado a seguir.

Como S é proporcional a I, então a saída do Arduino para a amostra de solo:

$$S_A = k_A * I_A$$

o mesmo pode ser afirmado para a saída no Arduino para a água destilada:

$$S_0 = k_A * I_0$$

ou para a amostra de solo na saída do multímetro:

$$S_V = k_V * I_V$$

e para a amostra de água pura na saída do multímetro:

$$S_0 = k_V * I_0$$

logo, isolando k para o Arduino:

$$S_A/I_A = k_A \text{ e } S_0/I_0 = k_A$$

ou para o multímetro:

$$S_V/I_V = k_V \text{ e } S_0/I_0 = k_V$$

o que remete a:

$$S_A/I_A = S_0/I_0 \text{ ou } S_V/I_V = S_0/I_0$$

onde de forma geral:

$$I/I_0 = S/S_0 \tag{6}$$

que é a variável transmitância (T) da amostra considerada, equação (5) no item 1.3.

Para um instante dado, a atenuação, conforme mencionado na introdução, impõe uma queda de caráter exponencial da intensidade da luz percebida pelo sensor com relação à turbidez ou absorbância do meio, considerando constante o comprimento do caminho óptico (b).

Pode-se assim utilizar a expressão:

$$T = I/I_0 = S/S_0 = e^{(-K_\tau * b * f(\tau))}$$

que resulta, aplicando logaritmos naturais a ambos membros,

$$\ln(S/S_0) = -K_\tau * b * f(\tau) \Rightarrow \ln(S_0/S) = K_\tau * b * f(\tau) \Rightarrow A = K_\tau * b * f(\tau) \tag{7}$$

onde $\ln(S_0/S)$ é a absorvância (A) e τ é a variável física turbidez ou alternativamente a textura, que é a variável escolhida neste trabalho, e a que será utilizada daqui em diante. Observe-se que a escolha da variável turbidez ou textura só muda o valor da constante K, que justamente permite ajustar fatores de unidades ou calibração adequados para cada caso.

Também aparece na equação (7) a função $f(\tau)$ que representa a relação funcional que vincula a absorvância com a textura. Como as constantes podem ser incluídas nos coeficientes da relação funcional $g(\tau)$, para simplificar a equação (7), esta pode ser reescrita:

$$f(\tau)/(K_\tau * b) = A \Rightarrow g(\tau) = A \Rightarrow \tau = g^{-1}(A) \quad (8)$$

o que indica que existe uma relação funcional entre a textura e a absorvância. Como esta relação funcional é a curva de calibração procurada, renomeando $g^{-1}(A)$ como $\text{Cal}(A)$, podemos escrever:

$$\tau = \text{Cal}(A) \quad (9)$$

que descreve a relação funcional de calibração procurada, que permite achar a textura a partir da medição de absorvância.

2.4. Relações matemáticas no sistema de medição

O sistema está baseado no entendimento conceitual e modelagem de relações funcionais entre variáveis próprias do fenômeno de interação da luz com os sedimentos, variáveis relacionadas ao processo de decantação, e variáveis relacionadas às características dos sedimentos em suspensão, variáveis relacionadas ao sistema sensor, todas elas mencionadas no item anterior. Mas devido às características do processo de decantação, existe uma variação temporal das variáveis, que será analisada nos próximos itens.

2.4.1. Relações temporais

Sabendo que a absorvância guarda uma relação funcional com a CSS, que pode ser diretamente proporcional, para concentrações baixas de sólidos suspensos (Lei de Beer-Lambert), podemos postular que a variação da absorvância ao longo do tempo, $A(t)$, durante o processo de decantação de uma amostra de solo suspensa, deverá conter informação sobre a variação temporal da concentração de sólidos suspensos, $\text{CSS}(t)$, na frente do sensor,

que depende da granulometria do sedimento, e, portanto, da textura do solo, colocado em suspensão em um líquido suporte como a água destilada.

A curva total obtida no processo de decantação, em termos de absorvância em função do tempo, vai possuir uma relação funcional analítica com a textura (hipótese de trabalho), possibilitando assim a determinação da textura a partir da absorvância. Com base nisso, procurou-se empiricamente a relação matemática que vincula a textura com a absorvância.

Utilizando a equação 9, considerando a absorvância variável no tempo, temos:

$$\text{Textura} = \text{Cal}(A(t)) \quad (10)$$

Por outro lado, o diâmetro equivalente das partículas (D) que sedimentam e o tempo de decantação estão relacionados pela Lei de Stokes, a partir da equação 2, considerando que a velocidade é uniforme, e portanto igual à relação entre a altura de decantação (h) e o tempo.

$v=h/t \Rightarrow t=h/v \Rightarrow$ substituindo v pela expressão da equação 2, temos

$$t = h / [D^2 * (\gamma_s - \gamma) / (18 * \mu)] \quad (11)$$

que representa uma relação quadrática inversa entre tempo e diâmetro de partícula.

Pelo qual podemos representar a absorvância em função diâmetro, Abs(D), e procurar, convenientemente, as relações dela com a textura. Isto é conveniente devido ao fato da textura ser definida na base de intervalos de tamanhos de partículas.

$$\text{Textura} = \text{Cal}(\text{Abs}(D)) \quad (12)$$

Observe-se que a função A(t) e a função Abs(D) são diferentes, porém relacionadas entre si.

Deduzimos assim que podemos procurar esclarecer a relação funcional de calibração entre textura e absorvância através da curva da absorvância em função do diâmetro de partícula, pois é a variável diâmetro a que define os intervalos texturais.

2.4.2. Parâmetros de calibração - Valor Médio

Uma vez obtida a curva Abs(D) experimentalmente é necessário usar parâmetros que caracterizam essa curva e que sejam sensíveis à textura do solo colocado em suspensão no

tubo. Vários parâmetros da curva foram analisados e não serão descritos em este trabalho embora tenham potencial de uso em curvas de calibração. Finalmente, visto que a absorvância é função da CSS, é natural pensar que o valor da absorvância no processo de decantação dentro do tubo está relacionado com a concentração das partículas daquele diâmetro na suspensão. Por esse motivo, é razoável postular que o valor médio (V.M.) da curva de absorvância em função de diâmetro, Abs(D), em um dado intervalo deve ser representativo da concentração de sólidos suspensos daquele tamanho na frente do sensor, relacionando-se então com a granulometria e conseqüentemente com a textura.

Para calcular os valores médios da absorvância na região da argila e do silte é usada a definição de valor médio através da integral:

$$V.M. = 1/(b - a) * \int_a^b f(x) dx \quad (13)$$

onde a e b representam os limites de diâmetros das regiões da argila (0 a 2 microns) e do silte (2 a 50 microns), e $f(x)$ representa a função da absorvância em função do diâmetro de partícula, Abs(D).

A integral anterior representa a área embaixo do gráfico de Abs(D), dividida pela amplitude do intervalo de diâmetros, o que produz um valor médio de absorvância para todo o intervalo. Esta integral pode ser calculada, para os intervalos do silte e da argila, por dois procedimentos: 1) Obter a função de correlação polinômica correspondente ao intervalo e integrá-la analiticamente; ou 2) por integração numérica dos dados experimentais, calculando a área de trapézios entre duas medições consecutivas de absorvância e diâmetro:

$$\text{Área Trapézio} = (A_n + A_{n+1}) * (D_n - D_{n+1}) / 2 \quad (14)$$

onde n e $n+1$ se referem a valores correspondentes a medições consecutivas de absorvância no tempo, correspondendo assim à presença de diâmetros de partículas decantadas diferentes na frente do sensor. Posteriormente, todas as áreas dos trapézios do intervalo foram somadas e divididas pela amplitude do intervalo. Assim foram achados valores médios para o intervalo da argila e do silte.

2.4.3. Extrapolação da absorbância ao intervalo da argila

Como o objetivo deste trabalho é a utilização do método para determinação de textura de solos ou sedimentos, a relação funcional de calibração instrumental será necessária em ao menos dois dos três intervalos de tamanhos de partícula: da areia (2000 a 50 microns), do silte (50 a 2 microns, da argila (<2 microns). Mas por estarem estas distribuições de tamanhos ligadas pela relação % areia + % silte + % argila=100, então é suficiente obter duas relações funcionais instrumentais, pois a outra é deduzida da mencionada relação. Devido à grande rapidez de decantação da areia em água destilada, dificultando a medição da absorbância naquele intervalo, foram escolhidos os intervalos do silte e da argila para caracterizar a textura.

No entanto, a medição da absorbância no intervalo da argila demanda tempos de medição da ordem de várias horas, o que retiraria parte da praticidade do método. De fato, em várias situações durante o período de desenvolvimento desta pesquisa, as medições precisaram ser interrompidas por questões de horário. Estes fatos, somados a observações da tendência a estabilização do sistema de medição após um tempo da ordem de dez minutos, levou a pensar na possibilidade de encontrar a curva de tendência na região estável e extrapolar as medições para o intervalo da argila.

Após vários testes, a conveniência e confiabilidade do procedimento de extrapolação foi verificada, embora esse estudo não seja apresentado em este trabalho, ficando estabelecido o seguinte processo: 1) Obtenção da curva $A(D)$ para tempos de 10 a 20 minutos dependendo da estabilização do sinal do sensor; 2) Obtenção da linha de tendência da absorbância na região mais fina do silte; 3) Extrapolação dos valores de absorbância para o intervalo da argila usando a equação da linha de tendência. Uma vez realizada a extrapolação, a curva estava pronta para o procedimento de integração e obtenção da média explicado no item anterior.

2.4.4. Obtenção dos parâmetros da curva $Abs(D)$ para calibração

Conforme explicado, para um dado sistema instrumental, uma vez feitas as medições do sinal do sensor (em números digitais, ND, Volts ou turbidez) em função do tempo para a amostra (S) e para água destilada (S_0), até estabilizar o sinal, podemos construir o gráfico da absorbância, ou seja $\log(S_0/S)$ em função do tempo ou em função do tamanho de partícula,

este último calculado a partir do tempo mediante o uso da lei de Stokes, obtendo a curva Abs(D).

A partir do gráfico de Abs(D) podemos calcular o valor médio da absorbância (diâmetro) no intervalo da argila (<2 microns) ou do silte (2 a 50 microns), isto para vários valores de textura conhecida, podendo assim obter a relação funcional instrumental entre absorbância e textura (% Argila ou % Silte), mediante a integração já explicada.

De acordo com a metodologia, as relações funcionais da textura e absorbância são obtidas para o intervalo da argila primeiro e posteriormente para o silte.

No intervalo do silte foi considerado que a absorbância resultante no processo de decantação corresponde tanto à concentração de argila quanto à de silte. Desta forma, é necessário descontar a absorbância média da argila no intervalo do silte, conforme descrito nas equações a seguir.

$$A_{\text{Argila}} = \text{Média}[\text{Abs}(D)] \quad \text{para } 0 < D \leq 2 \text{ microns} \quad (15)$$

$$A_{\text{Silte+Argila}} = \text{Média}[\text{Abs}(D)] \quad \text{para } 2 < D \leq 50 \text{ microns} \quad (16)$$

$$A_{\text{Silte}} = A_{\text{Silte+Argila}} - A_{\text{Argila}} \quad (17)$$

A relação entre absorbância e textura é estabelecida aplicando a metodologia anterior a várias suspensões “padrão” de textura conhecida. Após a obtenção dos resultados, duas curvas de calibração serão construídas:

- 1) a curva de % de argila em função de absorbância média na região da argila.
- 2) A curva de % de Silte em função da absorbância do silte

A partir das curvas de calibração, será possível deduzir a textura mediante medições diretas com o sistema óptico apresentado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Tempos de sedimentação

Na Tabela 1 são apresentados os resultados dos cálculos do programa do Quadro 1, fornecendo os tempos de decantação, dentro das condições utilizadas, para partículas nos diferentes intervalos de textura. Pode ser observado que a areia demora pouco mais de 22 segundos para decantar totalmente em um tubo com 5 cm de trajetória de decantação, ficando em suspensão, a partir desse momento, só partículas com diâmetros equivalentes que correspondem a silte e argila. A decantação total do silte é esperada após 3.86 horas, ficando a partir de então só argila em suspensão.

Tabela 1 – Tempos de sedimentação para frações argila, silte e areia calculados pela Lei de Stokes para uma sedimentação de 5 cm de altura segundo programa Scilab da Figura 4

Partícula	Diâm. inicial microns	Diâm. final microns	tempo inicial seg.	tempo final seg.	tempo inicial horas	tempo final horas
Argila	2	0.1	13900	5.56×10^6	3.86	1544
Silte	50	2	22.3	13900	6.2×10^{-3}	3.86
Areia	2000	50	0.014	22.3	3.9×10^{-6}	6.2×10^{-3}

Os dados da tabela justificam a escolha do silte e a argila como intervalos de trabalho, pois a metodologia proposta está baseada na sedimentação, e a areia decanta nos primeiros segundos, quando a agitação da amostra e a inicialização do procedimento de registro complicam a medição precisa da absorvância. Também pode ser observado que o silte fino leva 3,86 horas para decantar completamente, ficando só argila em suspensão a partir desse momento, precisando mais de 1500 horas para que partículas de argila de 0,1 microns decantem completamente. Este fato estabelece um interesse em incluir procedimentos que possam encurtar o tempo de medição, como a extrapolação proposta na metodologia para obter a absorvância na região da argila pela linha de tendência do silte fino.

3.2. Curvas de absorvância em função do diâmetro

Tendo como base a metodologia exposta, foram obtidas as curvas de absorvância em função do tempo, posteriormente convertidas a curvas de absorvância em função do diâmetro,

Abs(D), para amostras com diferentes texturas, curvas que são apresentadas a seguir nas Figuras 5 até 9.

Na análise das curvas, é importante lembrar que o diâmetro tem uma relação inversa com o tempo de decantação ($D = K \cdot t^{-1/2}$), ou seja, os diâmetros grandes decantam em breve intervalo de tempo e os diâmetros mais finos são os últimos e mais demorados para sedimentar. A forma dos gráficos revela que nos instantes iniciais da sedimentação, à direita do gráfico, aconteceram as maiores absorvâncias, pois todas as partículas de todos os tamanhos estavam presentes no volume na frente do sensor. Na Figura 5, para uma amostra com alta quantidade de argila (42%) e silte (45,2), a absorvância chega a atingir valores de 2,5.

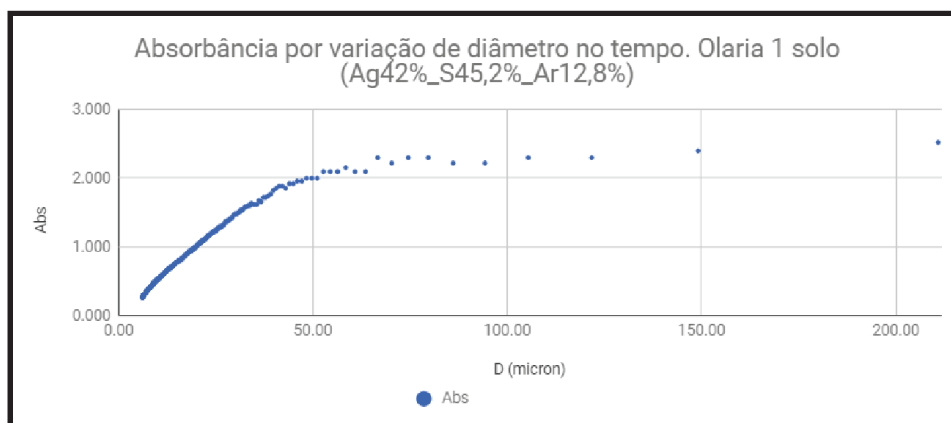


Figura 5 – Gráfico com valores de absorvância calculados a partir do sinal detectado em função da variação do tamanho de partícula de solo que decanta em relação ao tempo com base na Lei de Stokes (amostra Olaria 1 solo)

É perceptível também a tendência linear que acontece gradativamente na região do silte, que inicia em 50 microns, e valor de absorvância próximo de 2 no gráfico da Figura 5. De maneira geral, observa-se que a medida que o tempo passa, os diâmetros maiores decantam e então a suspensão fica progressivamente mais limpa, diminuindo assim a absorvância quando só as partículas menores estão ficando na solução.

Devido ao uso do diâmetro como variável independente, é possível identificar diretamente nos gráficos os intervalos correspondentes a argila (0 a 2 microns), silte (2 a 50 microns) e areia (50 a 2000 microns).

A sensibilidade das características da curva Abs(D) com a mudança de textura do sedimento ficam evidentes no gráfico da Figura 6, correspondente a uma amostra arenosa, com 18 % de argila, 22,8 % de silte e 59,2% de areia. Observa-se que a curva Abs(D), na

região da areia (> 50 microns) atinge valores máximos menores que 0,6 unidades de absorvância, consideravelmente menos que os 2,5 da Figura 5. Este comportamento pode ser atribuído ao efeito do tamanho de partícula na turbidez, conforme explicado em Sari et al. (2015).

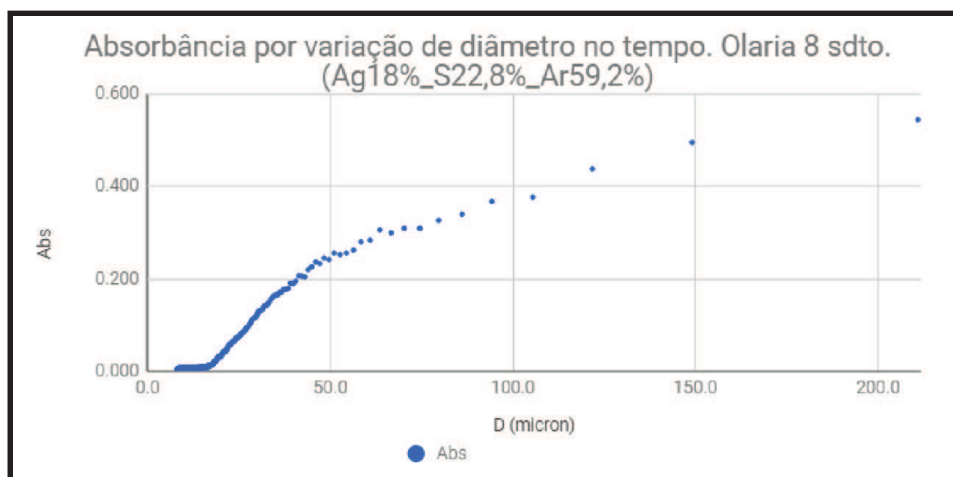


Figura 6 – Valores de absorvância calculados a partir do sinal detectado versus a variação do tamanho de partícula de solo que decanta em relação ao tempo com base na Lei de Stokes (amostra Olaria 8 sedimento)

Segundo Sari et al. (2015), pode-se dizer que a variação do sinal do sensor possui característica inversa ao tamanho da partícula, ou seja, quanto menor a partícula transportada maior o valor registrado pelo sensor, para uma mesma concentração de sólidos. Esse comportamento deve-se ao fato de que sedimentos de menor granulometria têm superfícies mais reflexivas por unidade de massa, devido a sua maior área específica, gerando maior poder de reflexão da luz. Por isso, para um dado valor constante de CSS, a resposta do sensor tende a aumentar à medida que o sedimento em suspensão torna-se mais fino. Estas considerações coincidem com as observações e conclusões do presente trabalho e servem como referência para entender o comportamento da função Abs(D) nos gráficos apresentados.

É importante lembrar que os tubos contendo a amostra de solos suspensa utilizados em este trabalho tinham uma CSS de 20 g/l em todas as amostras e seu processo de decantação é o que está registrado nos gráficos das Figuras 5 a 9.

Devemos enfatizar que durante um experimento de decantação de sólidos suspensos de acordo com a metodologia proposta, a CSS no volume de suspensão que fica na frente do

sensor vai variar ao longo do tempo, pois a decantação vai eliminando progressivamente os sólidos suspensos que passam para o fundo do tubo. Esta variação contém informação sobre a textura, visto que uma amostra argilosa vai ter variações bem diferentes de uma arenosa, como pode ser visto comparando a Figura 5 (amostra argilosa) com a Figura 6 (amostra arenosa).

Além do maior valor da absorvância para a amostra argilosa atingido na região da areia, também podem ser observadas marcadas diferenças no comportamento da curva Abs(D) na região do silte.

No início da decantação do silte (50 microns), a amostra argilosa (Figura 5) tem uma absorvância próxima de 2, enquanto na amostra arenosa a absorvância atinge ao redor de 0,25.

No final da decantação, na região do silte fino (< 10 microns), correspondente aos valores de diâmetro menores, no setor esquerdo do gráfico, a amostra argilosa, da Figura 5 ainda mantém valores de absorvância da ordem de 0,2, enquanto que a amostra arenosa indica valores próximos de zero.

Convém lembrar que os experimentos correspondentes aos gráficos apresentados tiveram duração entre 10 e 20 minutos, pelo qual os diâmetros das partículas que decantaram completamente ao final do tempo eram maiores que 5 microns, ainda dentro da região do silte fino, não atingindo a região de decantação exclusiva da argila. Por esse motivo, foi muito importante analisar as tendências da absorvância para o diâmetro tendendo a zero (em direção à argila), para avaliar as possibilidades de obter os valores de Abs(D) na região da argila por extrapolação. Nesse sentido, na Figura 5, na amostra argilosa, observamos uma tendência suave à linearidade, devido à considerável massa de sedimento ainda em suspensão no final do experimento (no início dos diâmetros), indicada por uma absorvância próxima a 0,2.

Diferentemente, na amostra arenosa da Figura 6, observa-se uma mudança abrupta, um ponto singular, passando a inclinação da curva de um valor positivo para praticamente zero (indo dos diâmetros maiores aos menores, de direita a esquerda). Isto indica que as partículas dispersoras da luz correspondiam a diâmetros maiores, que já tinham decantado totalmente ao final do experimento, e devido a isso a absorvância ficou praticamente nula.

Nas restantes curvas Abs(D) apresentadas (Figuras 7 a 9), serão aplicados os mesmos critérios de análise semi-quantitativo enunciados anteriormente, como forma de validação dos mesmos na análise de outras distribuições de tamanhos de partícula dos sedimentos.

Na Figura 7, a baixa absorvância na região da areia ($< 0,80$) indica uma amostra arenosa, com alta porcentagem de areia. Na região do silte, em 50 microns, a absorvância se mantém ao redor de 0,30, com tendência linear, indicando que existe uma distribuição de partículas finas siltosas que está decantando; no final do intervalo do silte, mais próximo da argila, aumenta a taxa de diminuição da absorvância, porém não atingindo o valor de zero, indicando a presença de uma distribuição fina mas em baixa porcentagem. Esta interpretação é coerente com os valores de textura da amostra, de 13% de argila, 24% de silte e 63% de areia.

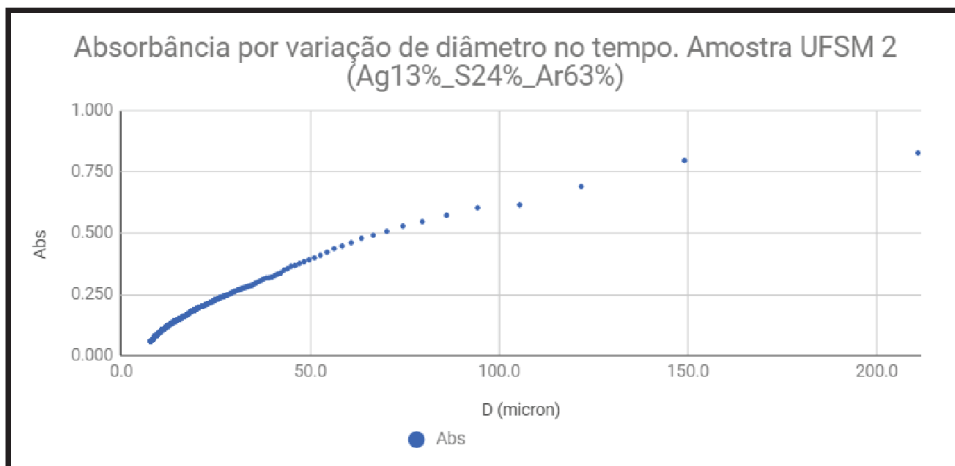


Figura 7 – Valores de absorvância calculados a partir do sinal detectado no sensor versus a variação do tamanho de partícula de solo que decanta em relação ao tempo com base na Lei de Stokes (amostra UFSM 2)

Na Figura 8, na região da areia ($D > 50$ microns) a absorvância atinge 1,5 indicando uma amostra argilosa; na região do silte, em 50 microns, a absorvância se mantém alta (1,2), e no final das medições, na região do silte fino, ainda está alta ($> 0,75$) indicando uma porcentagem alta de partículas finas, caracterizando uma amostra de alta porcentagem de argila e boa porcentagem de silte, interpretação coerente com os valores de textura de 65% de argila, 25,9% de silte e 9,1% de areia indicado pela medição pelo método tradicional de determinação de textura.

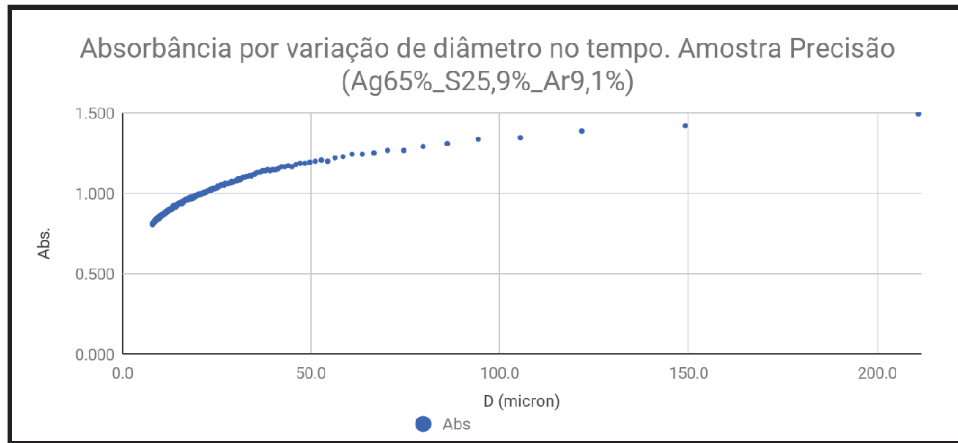


Figura 8 – Valores de absorbância calculados a partir do sinal detectado no sensor versus a variação do tamanho de partícula de solo que decanta em relação ao tempo com base na Lei de Stokes (amostra Precisão)

Finalmente, na Figura 9, o valor de absorbância máxima de 0,46 na região da areia indica uma amostra arenosa, mas como se mantém alto em 50 microns (0,38) na região do silte grosso e atinge 0,12 na região do silte fino, com tendência linear ao zero, inferimos a existência de uma distribuição onde predomina a areia, com baixa porcentagem de partículas finas, porém com predomínio da argila sobre o silte, o que é coerente com as porcentagens medidas pelo método tradicional, de 14% de argila, 7,6% de silte e 78,4% de areia.

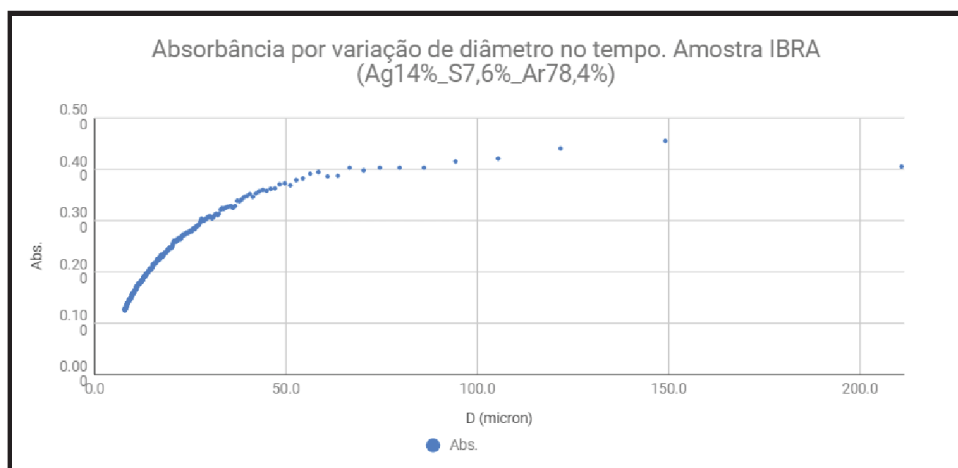


Figura 9 – Valores de absorbância calculados a partir do sinal detectado versus a variação do tamanho de partícula de solo que decanta em relação ao tempo com base na Lei de Stokes (amostra IBRA)

3.3. Linha de tendência e extrapolação na região da argila

Nas curvas Abs(D) discutidas anteriormente, observou-se que para os diâmetros menores do silte, tendendo à argila, a relação entre absorvância e diâmetro tende a ser mais linear, possibilitando assim uma boa representação dos dados experimentais por uma curva de tendência com bom ajuste. Isto é importante para diminuir o tempo de medição, pois pode ser usada a linha de tendência obtida na parte final do silte (silte fino), com diâmetros menores, para extrapolar os valores da região da argila, que levariam muitas horas para decantar totalmente. Por esse motivo são apresentadas as equações das linhas de tendência, Figuras 10 a 14, na região final do silte (que deposita em maior tempo), com as quais foi obtida a absorvância na região da argila, para cada diâmetro.

Na Figura 10 observa-se a curva Abs(D) na região de silte fino para a amostra argilosa da Figura 4, junto com a linha de tendência projetada para a região da argila. A equação da curva de tendência, $Abs = 0,0592 \cdot D + -0.0817$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,99$, pode ser usada para caracterizar o comportamento da absorvância na região do silte fino e a argila.

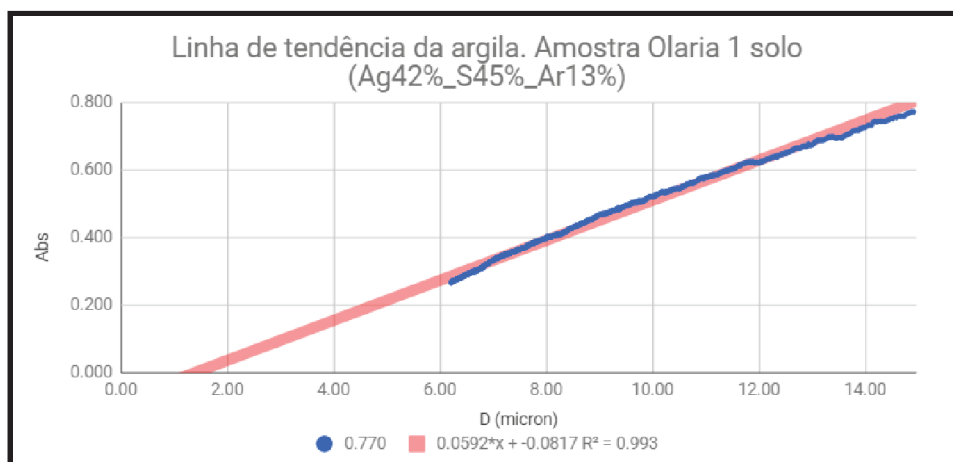


Figura 10 – Linha de tendência da absorvância quando o diâmetro da partícula e a concentração de sólidos suspensos tendem a zero, numa amostra de altas concentrações de argila e silte

O coeficiente angular de 5,92% indica presença de uma porcentagem alta de partículas finas, e o valor negativo da ordenada, que poderia ser ainda um pouco mais acentuado se se considera a região menor que 10 microns, indica um certo predomínio do silte e argila mais grossa do que a argila fina (Argila 42%, Silte 45%, Areia 13%). A equação de tendência foi

também usada para extrapolar os valores da região da argila, não medidos no experimento, economizando assim várias horas de medição.

Na Figura 11 os valores de coeficiente angular e ordenada na origem da equação de tendência são baixos ($Abs = 0,000529 * D + -0,000143$), indicando amostra arenosa, com leve predomínio do silte fino sobre a argila (Argila 18%, Silte 24%, Areia 59%). Pode também ser observado que a medição aparece um tanto ruidosa e pode ser revisada.

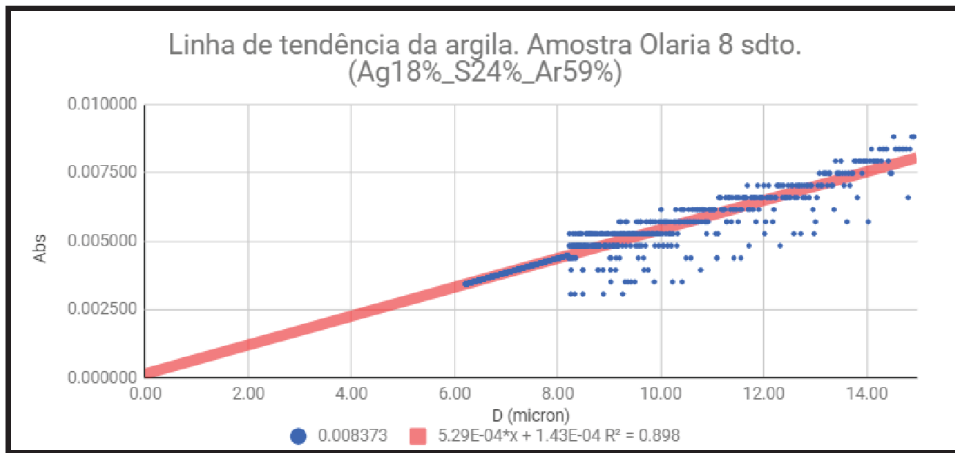


Figura 11 – Linha de tendência da absorvância quando o diâmetro da partícula e a concentração de sólidos suspensos tendem a zero, numa amostra de baixas concentrações de argila e silte

Na Figura 12, com $Abs = 0,0144 * D + -0,0556$, temos valores maiores que indicam presença de silte fino e argila grossa dentro de uma amostra predominantemente arenosa (Argila 13%, Silte 24%, Areia 63%).

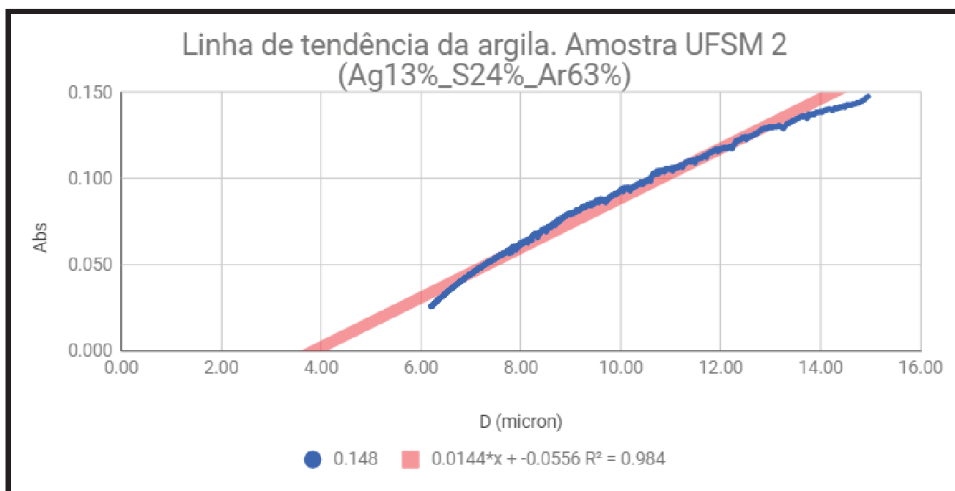


Figura 12 – Linha de tendência da Absorvância quando o diâmetro da partícula e a concentração tendem a zero, amostra de baixas concentrações de argila e de silte

Na Figura 13 temos $Abs = 0,00177 * D + 0,675$, o que indica tendência quase horizontal devido ao coeficiente angular pequeno, com alta absorvância devida à ordenada na origem alta, indicando alta porcentagem de argila e silte fino, com muito pouca areia (Argila 65%, Silte 25,9%, Areia 9,1%).

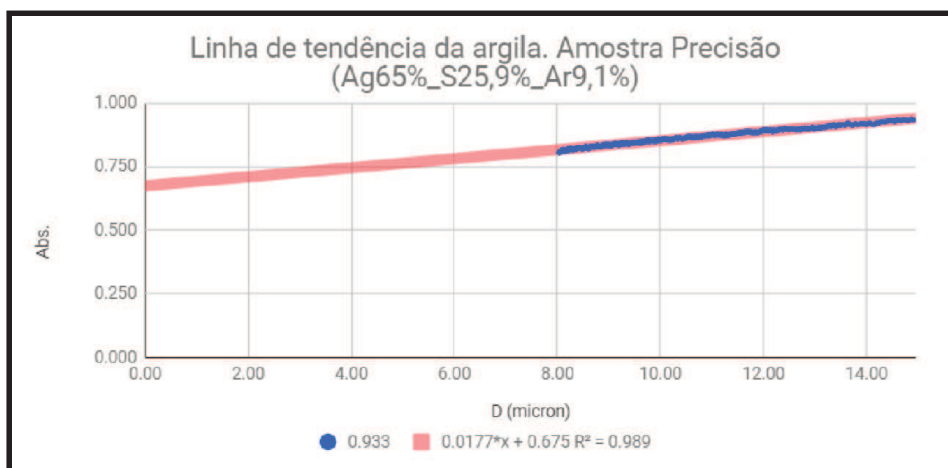


Figura 13 – Linha de tendência da absorvância quando o diâmetro da partícula e a concentração de sólidos suspensos tendem a zero, numa amostra de muito alta concentração de argila e bastante silte

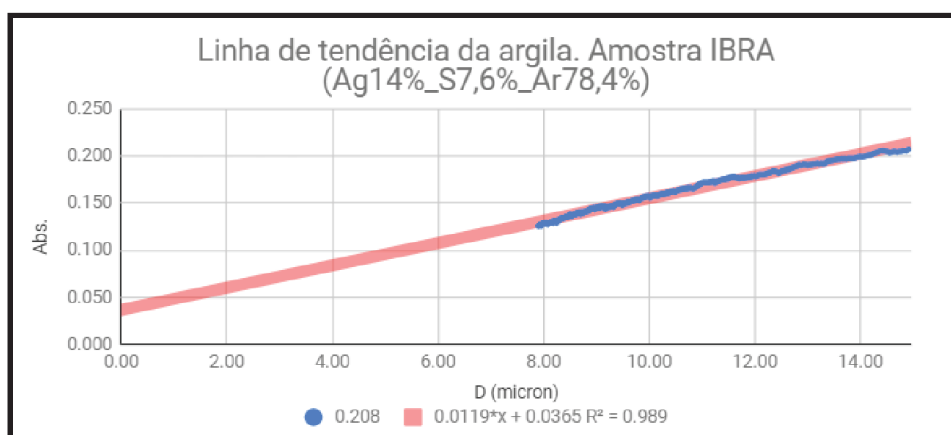


Figura 14 – Linha de tendência da absorvância quando o diâmetro da partícula e a concentração de sólidos suspensos tendem a zero, numa amostra de muito baixas concentrações de argila e de silte

De maneira geral, observa-se que a escolha do intervalo do silte fino para obtenção da reta de tendência deve ser criteriosa, visando utilizar só a parte linear. As equações de tendência analisadas também foram utilizadas para calcular os valores de absorvância na região do silte fino e argila faltantes, até atingir diâmetros de 0,1 microns.

Como indicador da bondade do ajuste usou-se o coeficiente de determinação, R^2 , que constitui-se em um grau percentual da qualidade de ajuste de um modelo, o qual varia entre 0 e 1 (Quinino et al., 2011). Os valores obtidos na região do silte fino conseguem ser próximos de 1, dependendo do cuidado na seleção dos dados. Como critério, tendências com coeficiente menor de 0,95 podem ser revisados, estendendo as medições por um tempo maior.

Os cálculos apresentados foram realizados em planilha eletrônica ou programa matemático (Scilab) ficando todos os intervalos de textura prontos para o cálculo do valor médio da absorvância nos mesmos. O valor médio da absorvância foi usado como parâmetro para a calibração da absorvância em função da textura, apresentada no próximo item.

3.4. Valores médios da absorvância da argila e do silte

Uma vez obtidas as curvas completas Abs(D) para amostras com diferentes concentrações granulométricas, determinadas pela técnica tradicional (RUIZ, 2005), foi calculado o valor médio da absorvância na região da argila, conforme explicado na metodologia.

Posteriormente foi determinada a média em toda a região do silte, da qual deve ser subtraída a absorvância média da argila, para termos só o valor correspondente ao silte.

Com as médias para diferentes texturas, será realizado o gráfico de porcentagem do argila em função da absorvância média, e o mesmo para o silte. A areia é a porcentagem residual da soma de silte e argila.

Finalmente, as integrais calculadas por integração analítica e as calculadas por integração numérica (mediante soma de trapézios), foram combinadas para formar as integrais completas em cada intervalo, e a média foi achada dividindo a integral pela amplitude do intervalo.

As Tabelas 2 e 3 mostram respectivamente os valores médios da absorvância da argila e do silte que ao serem relacionados com as respectivas texturas fornece as curvas de calibração da 5 amostras apresentadas nos gráficos das Figuras 15 e 16. Os valores de absorvância e textura plotados para silte e argila por separado foram posteriormente usados

para obter a função analítica de correlação com os resultados, que é a função representante do sistema calibrado, e que possibilita a obtenção da textura a partir da absorvância.

Tabela 2 – Valores médios da absorvância da argila e suas respectivas texturas.

Arg. (%)	Si. (%)	Abs. Ag.	Abs. Si.
13	23.6	0.0000	0.2480
14	7.6	0.0154	0.2700
18	22.8	0.0034	0.1091
42	45.2	0.1102	1.1922
65	25.9	0,6606	0,3923

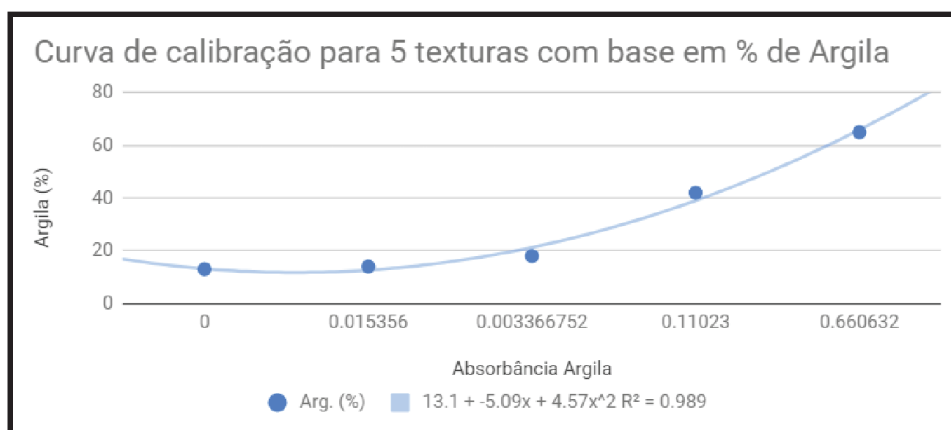


Figura 15 – Curva de calibração obtida dos valores médios da absorvância da argila ao serem relacionados com as respectivas texturas

Tabela 3 – Valores médios da absorvância do silte e suas respectivas texturas

Arg. (%)	Si. (%)	Abs. Ag.	Abs. Silte
14	7.6	0.015356	0.270000725
18	22.8	0.003366752	0.1090871623
13	23.6	0	0.2480261615
65	25.9	0.660632	0.3922855465
42	45.2	0.11023	1.192212212

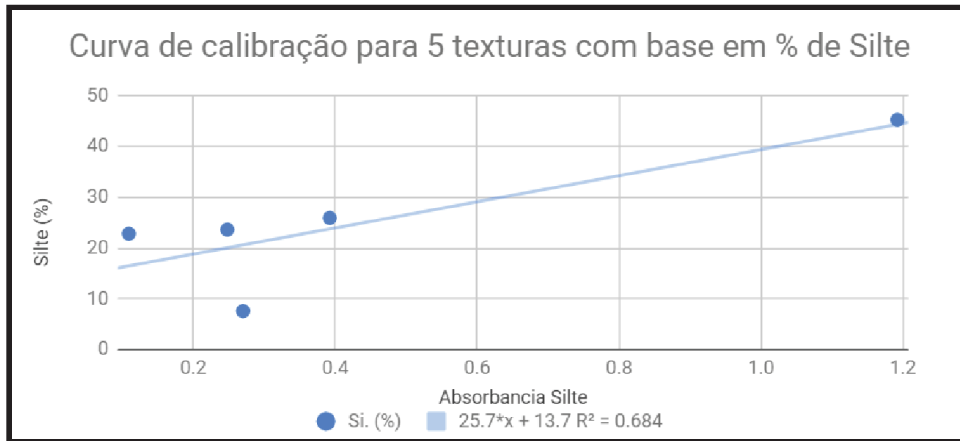


Figura 16 – Curva de calibração obtida dos valores médios da absorbância do silte ao serem relacionados com as respectivas texturas

Como indicador de ajuste foi usado o coeficiente de determinação R^2 . Os valores obtidos para a argila indicam que 99% da variação da textura foi refletida na variação da absorbância. Para o Silte a correlação indicou 68 % de compatibilidade das variações da absorbância e a textura; porém, esta correlação foi afetada por uma amostra em particular que deverá ser analisada em trabalhos futuros .

De maneira geral, os resultados apresentados sinalizam para o sucesso do método apresentado como metodologia para determinação da textura de solos.

Como continuidade do trabalho, podem ser salientados os seguintes itens:

- É necessário mais trabalho de compilação, revisão e confirmação dos dados experimentais e cálculos realizados.
- Os cálculos podem ser complementados com a análise de erros e incertezas do procedimento.
- Validação da metodologia medindo amostras incógnita.
- Pode ser realizado o aprimoramento e automatização do sistema instrumental, incluindo a curva de calibração no próprio algoritmo.
- Análise e desenvolvimento de modelos físico-matemáticos que representem o arranjo instrumental e metodológico escolhido.

- Descrição da integração pesquisa-ensino-extensão acontecida.

4. CONCLUSÕES

- 1) A configuração experimental simples com LED vermelho, fototransistor, resistores de 330 ohms e 10 kohms e fonte de 5 volts, conectados a placa arduino se mostrou adequada para o registro da resposta de um sensor óptico ao processo de decantação, chamada de curva $A(t)$.
- 2) As curvas de Absorbância em função do tempo, $A(t)$, ou de Absorbância em função do Diâmetro, $A(D)$, resultaram sensíveis, nas suas feições, à textura das amostras de referência utilizadas para calibração, anteriormente medidas pelo método tradicional.
- 3) O procedimento de obtenção da linha de tendência na região do silte fino e utilização da mesma para completar os dados de absorbância do silte e argila resultou adequado pois apresentou ótimo ajuste ($R^2 = 0.99$) e permitiu diminuir significativamente o tempo de medição.
- 4) O valor médio da absorbância da argila e do silte no intervalo correspondente mostrou ser um parâmetro adequado da curva $A(D)$ para o procedimento de calibração.
- 5) A hipótese sugerida de existência de uma relação funcional entre a absorbância e a textura obtida através de medições realizadas num sistema óptico simples em configuração turbidimétrica mostrou-se adequada à realidade experimental revelada pelos dados obtidos.
- 6) As correlações entre os dados de Absorbância Média no intervalo da argila e da absorbância média no intervalo do silte mostraram coeficientes de determinação de 0.99 e 0.68 respectivamente, para os dados aqui apresentados.
- 7) Pode ser considerado que existe uma boa correlação que permite pensar na aplicação do método para medição de textura.
- 8) As medições e cálculos ainda encontram-se em etapa de confirmação dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. 1984. Disponível em: <<https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/03/nbr-7181.pdf>> Acesso em: 27/07/2018.
- BRINKER, A.; RÖSCH, R. **Factors determining the size of suspended solids in a flow-through fish farm**. Aquacultural Engineering 33, p. 1-19, 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860904001025>> Acesso em: 15 mar., 2018.
- BUNT, J. A. C.; LARCOMBE, P.; JAGO, C. F. **Quantifying the response of optical backscatter devices and transmissometers to variations in suspended particulate matter**. Continental Shelf Research, v. 19, n. 9, p. 1199-1220, Jul 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434399000187>> Acesso em: 04 abr., 2018.
- CANIZELLA, B. T.; et al. XX CONGRESO LATINOAMERICANO e XVI CONGRESO PERUANO DA CIÊNCIA DO SOLO, Cusco, Perú, 2014. **Espectrometria de infravermelho próximo na predição da textura de solos desenvolvidos de basalto**. Embrapa Cerrados, DF, 2014. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1014214>>. Acesso em: 11 mar., 2018.
- DOWNING, J. **Twentyfive years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly**. Continental Shelf Res., v. 26, n. 17-18, p. 2299-2318, Nov. 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434306002469>> Acesso em: 06 jun., 2018.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.
- FERRARESI, T. M.; SILVA, W. T. L.; NETO, L. M.; SILVEIRA, P. M.; MADARI, B. E. **Espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, vol.36 n.6 Viçosa Nov./Dez. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832012000600010> Acesso em: 15 mai., 2018.
- GRAY, J.R.; GARTNER, J. W. **Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring**. Water Resources Res., v. 45, n. 4, W00D29, March, 2009. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2008WR007063>> Acesso em: 22 mai., 2018.
- HAIMAN et al. **An integrated suspended sediment transport monitoring and analysis concept**. International Journal of Sediment Research, v. 29, Issue 2, jun., 2014, Pages 135-148. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001627914600305>> Acesso em: 12 mai., 2018.

HARRINGTON, S. T. and HARRINGTON, R. J., 2013; **An assessment of the suspended sediment rating curve approach for load estimation on the Rivers Bandon and Owenabue**. Ireland; Geomorphology; Volume 185, 1 March 2013, Pages 27-38. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X1200551X>> Acesso em: 16 mai., 2018.

HARRIS, D. C., **Análise Química Quantitativa**, 6ª Edição, LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro-RJ, 2005.

HUDSON, R. **Interpreting Turbidity and Suspended-Sediment Measurements in High-Energy Streams in Coastal British Columbia**. Forest Research Technical Report, TR-008, 2001. Disponível em: <<https://www.for.gov.bc.ca/rco/research/hydroreports/tr008.pdf>> Acesso em: 07 jun., 2018.

KELLEY, M. R., NEALTH, I. & SURPRENANT, A. M. (2014). **A remember/know analysis of the semantic serial position function**. American Journal of Psychology, 127, 137-145. doi:10.5406/amerjpsyc.127.2.0137. Disponível em: <[https://memory.psych.mun.ca/pubs/articles/reprints/Kelley%20et%20al%20\(2014\).pdf](https://memory.psych.mun.ca/pubs/articles/reprints/Kelley%20et%20al%20(2014).pdf)> Acessado em: 18 mar., 2018.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Ed. Universidade de Passo Fundo, 2014.

KUHNLE, R. A.; WREN, D. G. Breakout Session I, **Suspended-Sediment Measurement: Data Needs, Uncertainty, and New Technologies**. In: GRAY, J. R. (Ed.). Proceedings of The Federal Interagency Sediment Monitoring Instrument and Analysis Research Workshop. Flagstaff, Arizona: USGS, 2003. (U.S. Geological Survey circular, 1276). Disponível em: http://pubs.usgs.gov/circ/2005/1276/pdf/circ1276_web_feb28.pdf. Acesso em: 12 dez., 2017.

LENCASTRE, A. **Hidráulica Geral**, Lisboa - Portugal: Hidroprojecto, edição luso brasileira, 1983, pg. 434.

MARTENS, H.; NIELSEN, J. P. and ENGELSEN, S. B. **Light Scattering and Light Absorbance Separated by Extended Multiplicative Signal Correction. Application to Near-Infrared Transmission Analysis of Powder Mixtures**. Anal. Chem. 2003, 75, 394-404. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Soren_Engelsen/publication/10902358_Light_Scattering_and_light_absorbance_separated_by_Extended_Multiplicative_Signal_Correction_EMSC_Application_to_NIT_analyses_of_powder_mixtures/links/5a0ddba70f7e9b7d4dba530d/Light-Scattering-and-light-absorbance-separated-by-Extended-Multiplicative-Signal-Correction-EMSC-Application-to-NIT-analyses-of-powder-mixtures.pdf> Acesso em 08/07/2018.

MNATI, M. J.; BOSSCHE, A. V. D. and CHISAB, R. F. **A Smart Voltage and Current Monitoring System for Three Phase Inverters Using an Android Smartphone Application**. Sensors, vol. 17, n. 4, p. 872, 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/17/4/872/htm>> Acesso em: 22 mar. 2018.

MONGIA, G. E.; ZIEGLER, G. R., 2000 **The role of particle size distribution of suspended solids in defining the flow properties of milk chocolate**. International Journal of Food Properties, p. 137-147, publicado on line set. 2009. Disponível em:

<<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10942910009524621?needAccess=true>>
Acesso em: 22, mar., 2018.

MORAIS, I. P. A.; TÓTH, I. V. e RANGEL, A. O. S. S. **Turbidimetric and Nephelometric Flow Analysis: Concepts and Applications**. Spectroscopy Letters, 39:6, 547-579. Disponível em: <<https://repositorio.ucp.pt/handle/10400.14/6710>> Acesso em: 12 mai. 2018.

MOREIRA, A. F. **Construção e caracterização de um fotômetro destinado ao uso de aulas experimentais de química sobre a lei de Beer-Lambert**. HOLOS, Ano 32, Vol. 2. Mar. 2016. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/4016>>. Acesso em: 04/2018.

PRUIT, B. A. **Uses of turbidity by states and tribes**. In: GRAY, J. R.; GLYSSON, G. D. (Ed.). Proceedings Federal Interagency Workshop on Turbidity and other Sediment Surrogates. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 2002. (Circular 1250). Disponível em: <<https://water.usgs.gov/osw/techniques/TSS/pruitt.pdf>> Acesso em: 07/06/2018.

QUININO, R. C.; REIS, E. A.; BESSEGATO, L. F. **O Coeficiente de Determinação R2 como Instrumento Didático para Avaliar a Utilidade de um Modelo de Regressão Linear Múltipla**. Departamento de Estatística – ICE – UFJF - Brasil. Disponível em: <http://www.est.ufmg.br/portal/arquivos/rts/PD_28102011_Final.pdf> Acessado em: 12 abr., 2018.

RÜGNER, H., et al. **Turbidity as a proxy for total suspended solids (TSS) and particle facilitated pollutant transport in catchments**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs12665-013-2307-1.pdf>> Acesso em: 07/06/2018.

RUIZ, H. A. 2005. **Increased accuracy in particle-size analysis by sampling the silt plus clay suspension**. Revista Brasileira De Ciência Do Solo, 29: 297–300. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/0D/rbcs/v29n2/24166.pdf>> Acesso em:07/07/2018.

SALOMONE, H.D.; OLIVIERI, N.A.; VÉLIZ, M.E.; RAVIOLA, L. **A non-traditional fluid problem: Transition between theoretical models from Stokes' to turbulent flow**. European Journal of Physics 39 (2018) 035002. Disponível em: <file:///C:/Users/hal9001/Desktop/Textura%20Medi%C3%A7%C3%B5es/Salomone_2018_Eur._J._Phys._39_035002.pdf> Acesso em:07/07/2018

SARI, V. et al. **Estimativa da concentração de sedimentos suspensos com sensores ópticos: revisão**. RBRH vol. 20 n.4 Porto Alegre out./dez. 2015 p. 817 a 836. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=156&SUMARIO=5110>> Acesso em: 04/2018.

SCILAB ENTERPRISES (2012). **Scilab: Free and Open Source software for numerical computation** (OS, Version 5.XX) [Software]. Disponível em: <<http://www.scilab.org>> Acesso em: 12 mar. 2018.

SENDRA, S.; LLARIO, F.; PARRA, L.; LLORET, J.. **Smart Wireless Sensor Network to Detect and Protect Sheep and Goats to Wolf Attacks**. Universidad Politécnica de Valencia Camino Vera s/n, Valencia, Spain, Dez. 2013. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/profile/Jaime_Lloret/publication/263726337_Smart_Wireless_Sensor_Network_to_Detect_and_Protect_Sheep_and_Goats_to_Wolf_Attacks/links/0a85e53c57df21ea54000000/Smart-Wireless-Sensor-Network-to-Detect-and-Protect-Sheep-and-Goats-to-Wolf-Attacks.pdf> Acesso em: 20 mar. 2018.

SHELLENBARGER, G. G.; WRIGHT, S. A.; SCHOELLHAMER, D. H. **A sediment budget for the southern reach in San Francisco Bay, CA: implications for habitat restoration.** *Marine Geology*, v. 345, p. 281-293, Nov. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025322713000820>> Acesso em: 04 mar. 2018.

SILVA, E. M. et al. **Comparação de modelos matemáticos para o traçado de curvas granulométricas.** *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.39, n.4, p.363-370, abr. 2004. Disponível em: <<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/viewFile/6782/3838>> Acesso em: 04 jun. 2018.

TANANAEV, N. I.; DEBOLSKIY, M. V. **Turbidity observations in sediment flux studies: examples from Russian rivers in cold environments.** *Geomorphology*, v. 218, p. 63-71, Ag. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X13005151>> Acesso em: 18 jun. 2018.

U.S.G.S, UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **National field manual for the collection of water-quality data.** U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chaps. A1-A10. Disponível em: <<http://pubs.water.usgs.gov/twri9A>> Acesso em: 07 jun. 2018.

WENTWORTH, C.K. **A scale of grade and class terms for clastic sediments.** *Journal of Geology*, 30:377-392,1922.

WIRANTO, G.; HERMIDA, I.D.P.; FATAH, A. WASLALUDDIN. **Design and realisation of a turbidimeter using TSL250 photodetector and Arduino microcontroller.** In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, Kuala Lumpur, Malaysia, 17–19 August 2016; pp. 324–327. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7573657>> Acesso em: 25 abr., 2018.