



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

Gustavo Leal Barbosa Silva

ANÁLISE DOS MODELOS EMPÍRICOS PARA O CÁLCULO DE TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EM CONDIÇÕES DE FLUXO UNIDIRECIONAL

Palmas - TO

2017

Gustavo Leal Barbosa Silva

ANÁLISE DOS MODELOS EMPÍRICOS PARA O CÁLCULO DE TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EM CONDIÇÕES DE FLUXO UNIDIRECIONAL

Trabalho de Conclusão de curso (TCC) II elaborado e apresentado como requisito parcial para obtenção de título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Professora Dr^a. Elizabeth Hernández Zubeldia.

Palmas - TO

2017

GUSTAVO LEAL BARBOSA SILVA

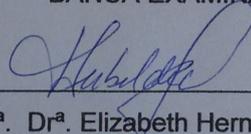
ANÁLISE DOS MODELOS EMPÍRICOS PARA O CÁLCULO DE TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EM CONDIÇÕES DE FLUXO UNIDIRECIONAL

Trabalho de Conclusão de curso (TCC) II elaborado e apresentado como requisito parcial para obtenção de título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Professora Dr^a. Elizabeth Hernández Zubeldia.

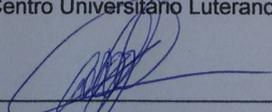
Aprovada em 26 de Maio de 2017.

BANCA EXAMINADORA



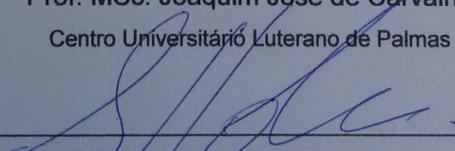
Prof^a. Dr^a. Elizabeth Hernández Zubeldia.

Centro Universitário Luterano de Palmas



Prof. MSc. Joaquim José de Carvalho

Centro Universitário Luterano de Palmas



Prof. MSc. Carlos Spartacus da Silva Oliveira

Centro Universitário Luterano de Palmas

Palmas - TO

2017

RESUMO

SILVA, Gustavo Leal Barbosa. **Análise dos modelos empíricos para o cálculo de transporte de sedimentos em condições de fluxo unidirecional**. 2017. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2017.

O presente trabalho discute sobre os modelos matemáticos existentes para calcular o volume de sedimentos transportados em fluxo unidirecional. Cada tipo de modelo possui suas limitações e é melhor aplicado em dadas situações, por isso a importância da análise de cada modelo para então obter um resultado de maior confiança. Foi realizado comparações de resultados entre modelos matemáticos e resultados de laboratório, provando a eficácia dos resultados dos modelos, a facilidade na coleta das amostras e o menor custo envolvido na operação quando comparado com o método laboratorial, porém sempre deve ser obedecido os pré-requisitos de utilização de cada metodologia. A análise de sensibilidade utilizando o método FOSM pode provar quão sensível é cada modelo quando se modifica uma variável individualmente, as variáveis analisadas foram o diâmetro da partícula, a densidade do sedimento, a altura da lâmina de água e a declividade, com esse resultado pode se verificar quão sensível é cada modelo a cada variável, permitindo verificar com maior facilidade o modelo que mais se adequa a diferentes tipos de situação real.

Palavras-chave: Transporte. Sedimentos. Modelos.

ABSTRACT

SILVA, Gustavo Leal Barbosa. **Análise dos modelos empíricos para o cálculo de transporte de sedimentos em condições de fluxo unidirecional**. 2017. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2017.

The present work discusses the existing mathematical models to calculate the volume of sediments transported in unidirectional flow. Each type of model has its limitations and is best applied in given situations, so an analysis value of each model for a more reliable result. Results were compared between mathematical models and laboratory results, an evaluation of the results of the models, an ease in the collection of samples and the lower cost involved in the treatment when compared to the laboratory method, but always the requirements of Use of Each methodology. Sensitivity analysis using the FOSM method can prove that it is sensitive to each model when a variable is modified individually, such as variables analyzed for particle diameter, sediment density, water height and slope, with this result can Check how sensitive each model is to each variable, allowing you to check with greater ease or model that best suits different types of real situation.

Keywords: Transportation. Sediments. Models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do transporte de sedimentos.....	16
Figura 2 - Classificação do transporte de sedimentos.....	17
Figura 3 - Distribuição granulométrica dos sedimentos.....	20
Figura 4 - Mudança da dinâmica e do nível da base de um rio causada pela construção de uma barragem.....	24
Figura 5 - Geometria de um canal retangular.....	25
Figura 6 - Diagrama de shields	28
Figura 7 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos.....	35
Figura 8 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos.....	37
Figura 9 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos.....	38
Figura 10 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos.....	40
Figura 11 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos.....	41
Figura 12 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos.....	43
Figura 13 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos.....	44
Figura 14 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos.....	46

Figura 15 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos.....	47
Figura 16 – Comparativo dos melhores resultados de modelos matemáticos	48
Figura 17 - Mapa de Localização do Córrego Machado.....	49
Figura 18 - Caracterização do solo na área de estudo.....	50
Figura 19 - Declividade Média do Córrego Machado	51
Figura 20 - Coleta de amostra em Córrego Machado	52
Figura 21 - Locais de coleta de amostra	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das partículas sedimentares segundo o diâmetro de peneiração.....	19
Tabela 2 – Massa específica de alguns materiais.....	21
Tabela 3 – Tabela de parâmetros	33
Tabela 4 – Tabela de sensibilidade dos parâmetros	33
Tabela 5 – Tabela com parâmetro de Profundidade média do Córrego Machado	52
Tabela 6 – Coordenadas dos pontos de coleta de amostra	53
Tabela 7 – Valores médios e variância de diâmetros médios	54
Tabela 8 – Tabela de massa específica.....	54
Tabela 9 – Método FOSM para modelo Meyer – Peter e Muller	54
Tabela 10 – Método FOSM para Modelo Eisten - Brown	55
Tabela 11 - Método FOSM para Modelo Yalin	55
Tabela 12 - Método FOSM para Modelo Van Rjin.....	56
Tabela 13 - Método FOSM para Modelo Nielsen	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 01	34
Quadro 2 - Resultados para ensaio 01.....	35
Quadro 3 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 02	36
Quadro 4 - Resultados para ensaio 02.....	36
Quadro 5 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 03	37
Quadro 6 - Resultados para ensaio 03.....	38
Quadro 7 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 04	39
Quadro 8 - Resultados para ensaio 04.....	39
Quadro 9 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 05	40
Quadro 10 - Resultados para ensaio 05.....	41
Quadro 11 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 06	42
Quadro 12 - Resultados para ensaio 06.....	42
Quadro 13 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 07	43
Quadro 14 - Resultados para ensaio 07.....	44
Quadro 15 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 08	45
Quadro 16 - Resultados para ensaio 08.....	45
Quadro 17 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 09	46
Quadro 18 - Resultados para ensaio 09.....	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVOS.....	12
1.1.1. Objetivos Gerais	12
1.1.2. Objetivos Específicos	12
1.2. JUSTIFICATIVA.....	12
1.3. PROBLEMA.....	13
1.4. HIPÓTESE.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 DEFINIÇÃO DE EROÇÃO.....	14
2.1.1 Métodos diretos para medição de erosão	14
2.1.2 Métodos indiretos para medição de erosão	15
2.2 SEDIMENTAÇÃO.....	15
2.2.1 Classificação do transporte de sedimentos	16
2.2.1.1 Rolamento	17
2.2.1.2 Deslizamento	17
2.2.1.3 Saltação	18
2.2.1.4 Suspensão	18
2.2.1.5 Turbidez	18
2.3 PARÂMETROS PARA CÁLCULO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	18
2.3.1 Dimensão geométrica	18
2.3.2 Forma do sedimento	20
2.3.3 Velocidade de sedimentação	20
2.3.4 Massa específica	20
2.4 IDENTIFICAÇÃO DO TIPO DE TRANSPORTE.....	21
2.4.1 Modelo Proposto por RAUDKIVI 1990 apud BARCELOS 2005	21
2.5 ASSOREAMENTO	23
2.6 Canais hidráulicos	24
2.6.1 Elementos geométricos de um canal hidráulico	24
2.6.2 Características de um canal hidráulico	25
2.7 MODELOS MATEMÁTICOS PARA CÁLCULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DA DESCARGA DE FUNDO.....	26

2.7.1 Modelo de Meyer-Peter e Muller (1948)	28
2.7.2 Modelo de Eistein-Brown (1950)	29
2.7.3 Modelo de Yalin (1963)	29
<i>2.8 MODELOS MATEMÁTICOS PARA CÁLCULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE DESCARGA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO</i>	30
2.8.1 Método de Van Rijn (1984)	30
2.8.2 Modelo matemático de Nielsen (1992)	30
3. METODOLOGIA	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
<i>4.1. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS</i>	34
4.1.1. ENSAIO 01 (Inclinação 0,5% e Tempo de 300 segundos)	34
4.1.2. ENSAIO 02 (Inclinação 1,0% e Tempo de 300 segundos)	36
4.1.3. ENSAIO 03 (Inclinação 1,5% e Tempo de 300 segundos)	37
4.1.4. ENSAIO 04 (Inclinação 0,5% e Tempo de 60 segundos)	39
4.1.5. ENSAIO 05 (Inclinação 1,0% e Tempo de 60 segundos)	40
4.1.6. ENSAIO 06 (Inclinação 1,5% e Tempo de 60 segundos)	42
4.1.7. ENSAIO 07 (Inclinação 0,5% e Tempo de 600 segundos)	43
4.1.8. ENSAIO 08 (Inclinação 1,0% e Tempo de 600 segundos)	45
4.1.9. ENSAIO 09 (Inclinação 1,5% e Tempo de 600 segundos)	46
4.2 SENSIBILIDADE DOS MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZANDO MÉTODO FOSM	49
4.2.1 Caracterização da área do Córrego Machado	49
4.2.2 Fatores que afetam a produção de sedimentos	50
4.2.3 Variáveis de entrada nos modelos	50
4.2.4 Cálculo de sensibilidade usando método FOSM	54
5. CONCLUSÃO	57
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
APÊNDICES	61

1. INTRODUÇÃO

O crescimento econômico e populacional é algo incontornável e resulta em degradações ambientais e no consumo excessivo de recursos naturais. A supressão de áreas florestais e a sua substituição por outros tipos de cobertura é fato constante no Brasil, que juntamente com as técnicas de manejo inadequadas resultam em erosão do solo.

A erosão é um processo natural, porém vem sendo potencializado pela ação humana e que em excesso gera um grande volume de sedimentos que no ciclo hidrológico são descarregados naturalmente nos cursos d'água.

De acordo com Santos et al (2001) a perda de sólidos da bacia pode ser denominada de descarga sólida e está intrinsecamente interligada as características das partículas que compõem as cargas de sedimentos e os fatores hidrológicos que controlam as características do regime de escoamento superficial.

O controle da quantidade de sedimentos que é carregada para o leito do rio pode ser medido em campo, em laboratório ou por meio de métodos empíricos (também chamado de método matemático), sendo que mesmo os dois últimos não estão isentos da necessidade de coleta de material em campo. O método matemático é o mais barato e também o mais fácil de ser aplicado, possuindo bons resultados quando usado de maneira correta.

Portanto, o conhecimento da descarga sólida é necessário para análise da degradação de uma bacia, verificação da qualidade d'água para abastecimento e estudos de assoreamento de rios e reservatórios. As características de quantidade e qualidade dos sedimentos transportados aos rios, além de informar sobre as características e/ou estado da bacia hidrográfica, apresentam grande relevância para a manutenção de ecossistemas, planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos.

Tendo em vista que o estudo do transporte de sedimentos tem grande importância e que o método matemático possui suas vantagens em relação aos outros, podendo mensurar com boa precisão o transporte de sedimentos se escolher dentre os vários métodos de cálculo existente, aquele que mais se adequa a cada caso específico, obedecendo suas premissas (CARVALHO, 2000).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivos Gerais

Realizar uma análise comparativa entre modelos empíricos para o cálculo de transporte de sedimentos granulares em condições de fluxo unidirecional.

1.1.2. Objetivos Específicos

- 1) Esclarecer a importância do estudo de transporte de sedimentos em canais hidráulicos (rios, riachos e etc).
- 2) Identificar os modelos empíricos existentes que permitam estimar a taxa de transporte de sedimentos com granulometria não uniforme.
- 3) Verificar qual modelo tem uma melhor representatividade do transporte de sedimento quando comparado com os dados das variáveis mensuradas em laboratório.
- 4) Analisar o comportamento do volume de sedimentos transportado quando se varia incógnitas (que influenciam diretamente no resultado) individualmente nos modelos matemáticos encontrados.

1.2. JUSTIFICATIVA

O estudo de transporte de sedimentos é de grande importância no projeto e operação de barragens e principalmente na análise do transporte natural de sedimentos em rios, riachos e afins.

Para estimar o transporte de sedimentos existem modelos experimentais e modelos matemáticos, os experimentais são divididos em modelo feito em campo e realizado em laboratório, sendo que ambos são relativamente caros, geralmente demandam muito tempo e as vezes não têm um bom resultado devido à dificuldade de mensurar o transporte de sedimentos na carga de fundo ou da carga em suspensão.

Já os modelos matemáticos podem ter uma boa estimativa do transporte de sedimentos, com um custo menor, porém ainda deve ser realizado a coleta de dados em campo (essa coleta é mais fácil do que a feita nos outros modelos) para então alimentar as fórmulas e conseguir resultados precisos, até porque estas fórmulas matemáticas foram deduzidas por meio de coletas em campo e ensaios laboratoriais.

Por causa do grande número de modelos matemáticos, a seleção da fórmula é de grande importância, pois cada método leva em consideração um tipo de material do leito, um tipo de transporte (de fundo ou em suspensão) e ainda suas condições de fluxo (velocidade, altura da lâmina da água, largura do canal, declividade, peso específico das partículas e etc). Por isso, é necessário entender o comportamento e as limitações de cada fórmula, para saber qual é a mais adequada para ser aplicada em casos específicos.

1.3. PROBLEMA

Algum modelo matemático possui boa representatividade no tocante ao volume de sedimentos transportado quando comparado ao modelo experimental realizado em laboratório?

1.4. HIPÓTESE

Utilizando modelos empíricos para o cálculo de transporte de sedimentos é possível estimar a taxa de material transportado em ensaios de canal hidráulico em laboratório.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DEFINIÇÃO DE EROSIÃO

O termo erosão deriva do latim (erodere) e significa desgastar. Nos estudos ligados à ciência da terra, o termo é aplicado aos processos de corrosão da superfície terrestre (solo ou rocha) pela ação da água, do vento, de queimadas, do gelo e de organismos vivos (plantas e animais), além da ação humana (CARVALHO et al, 2006).

A erosão é um processo mecânico de desprendimento de partículas, que acontece naturalmente na superfície ou em profundidade e que vem sendo aumentada pela ação catalisadora do homem. Pode ser definida como a desagregação, transporte e deposição de partículas de solo, subsolo e rochas em decomposição pelas águas, ventos ou geleiras (MAGALHÃES, 2001).

De acordo com Simões et al (2001) quando a erosão é natural, os processos geológicos se encontram em equilíbrio, porém quando esse equilíbrio é quebrado com taxas maiores de erosão, ocorre a erosão acelerada, que possui um desprendimento muito maior de partículas e que geralmente é causada pelas ações humanas.

Segundo Carvalho et al (2006):

O processo erosivo depende de fatores externos como o potencial de erosividade da chuva, condições de infiltração e escoamento superficial, a declividade e comprimento do talude ou encosta e, ainda, de fatores internos como gradiente crítico, desagregabilidade e erodibilidade do solo. A evolução da erosão ao longo do tempo depende de fatores tais como características geológicas e geomorfológicas do local, presença de trincas de origem tectônica e evolução físico-química e mineralógica do solo.

2.1.1 Métodos diretos para medição de erosão

Os dados de erosão de solo podem ser adquiridos em laboratório ou diretamente em campo, por meio de equipamentos e medições in loco. De acordo com Morgan (2005), os dados coletados em campo são mais apropriados, porém podem ser mais difíceis de serem obtidos, devido as mudanças e interferências que acontecem no campo.

2.1.2 Métodos indiretos para medição de erosão

Os métodos indiretos fazem a medição da erosão por meio de fórmulas empíricas, no qual se obtém o fator K (fator relacionado a erodibilidade do solo), porém deve ser feito a calibração desse valor de acordo com o tipo de solo e região. Há vários métodos para a obtenção indireta da erodibilidade do solo (Dumas, 1965; Wischmeier & Mannering, 1969; Wischmeier et al., 1971; Roth et al., 1974; El-Swaify & Dangler, 1977; Römken et al., 1977; Denardin, 1990; Lima et al., 1990; Roloff & Denardin, 1994; e Marques et al., 1997), cada qual com suas peculiaridades e desenvolvidos para uma dada região e/ou tipo de solo (LIMA et al, 2007).

O aumento da erosão contribui com uma maior quantidade de sedimentos no leito de rios, porém o trabalho tem como objetivo saber a quantidade de sedimentos existentes já no leito do rio, portanto não foi usado para o cálculo da taxa de transporte de sedimentos.

2.2 SEDIMENTAÇÃO

Os sedimentos são partículas que por meio de um processo físico, químico ou biológico desprendem-se das rochas e que por meio dos agentes naturais são transportados e depositados (MARCELINO, 2009).

A sedimentação é um processo físico que envolve os sedimentos e compreende desde a erosão, transporte nos cursos d'água até a deposição. Estes processos ocorrem naturalmente em todo o planeta, sendo de grande importância devido serem responsáveis pela modelagem do relevo (CARVALHO, 1994).

Entre os agentes naturais, que tornam possível a sedimentação, estão a água, a gravidade, o vento, o gelo e agentes biológicos. Os sedimentos transportados e depositados por escoamento de águas são denominados sedimentos fluviais (CARVALHO, 1994).

Os cursos d'água possuem um equilíbrio em relação ao transporte de sedimentos, seja por deslizamento e saltação junto ao leito, seja em suspensão na corrente, sendo que existe uma tendência natural dos sedimentos se depositarem quando estes encontram água com menor velocidade, conforme a maior ou menor granulação das partículas e a menor turbulência do escoamento (GLYMPH, 1973; CARVALHO, 2000).

De acordo com Glymph (1973) a quantidade de sedimento depositada em um reservatório depende de 2 fatores:

- a quantidade de material em suspensão enviada pelo reservatório;
- a capacidade do reservatório reter as partículas em suspensão.

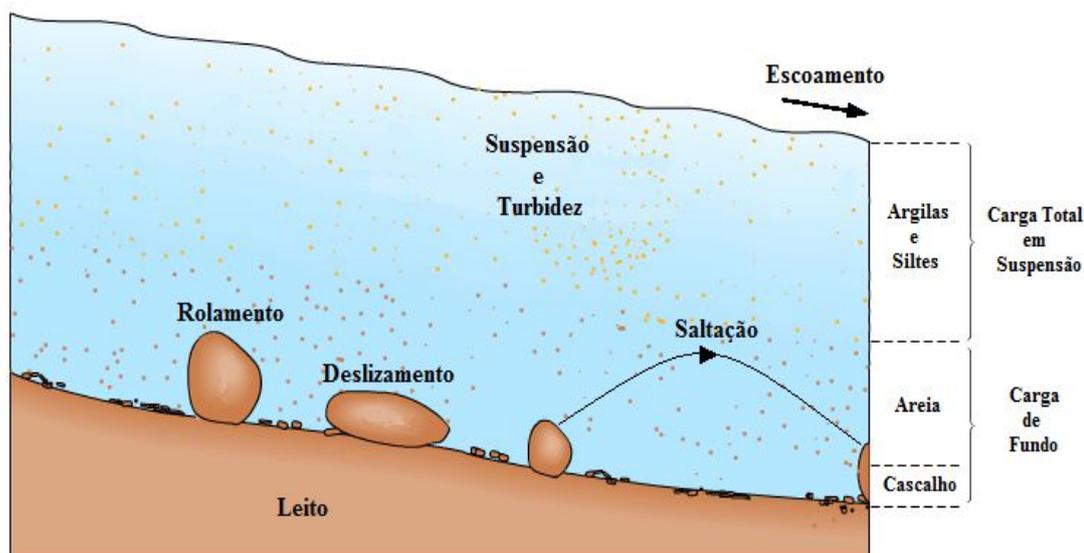
Segundo Brune e Allen (1941) os motivos que influenciam a deposição de sedimentos em um reservatório são: a capacidade de retenção do reservatório, a quantidade de sedimentos que adentra no reservatório, o modo de operação do reservatório e a quantidade de sedimentos acumulado no mesmo.

De acordo com Vanoni (1977) a deposição e a distribuição dos sedimentos dentro de um reservatório dependem de vários fatores como: geometria do reservatório, declividade do talvegue, o modo como é operado, características minerais das partículas e características físicas da água.

2.2.1 Classificação do transporte de sedimentos

Segundo Van Rijn (1984) há dois tipos de transporte de sedimentos por meio do escoamento da água, são eles o transporte de carga de fundo e o transporte da carga em suspensão, o tipo de transporte depende principalmente do tamanho e composição das partículas do leito e das condições do escoamento, como mostra a figura 1.

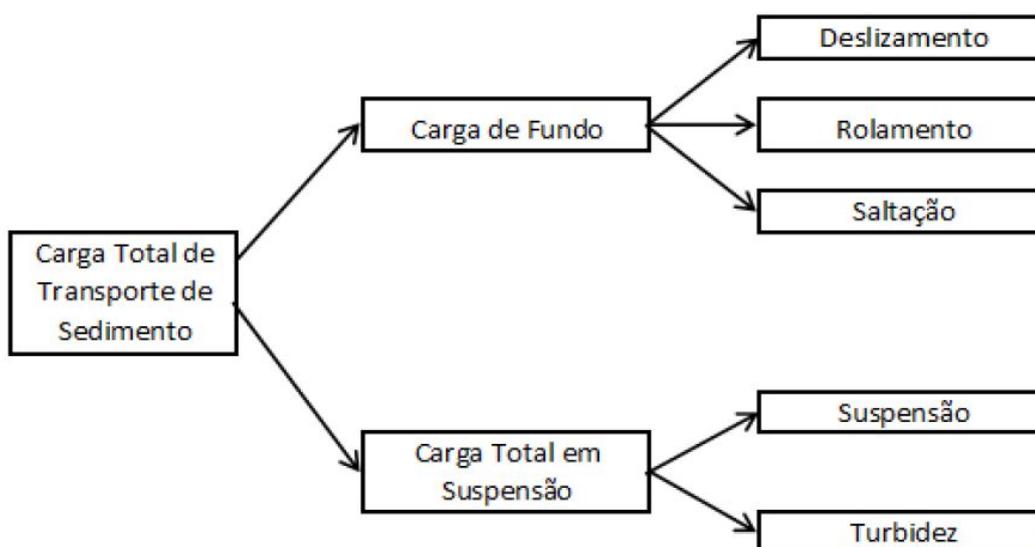
Figura 1 - Esquema do transporte de sedimentos



Fonte: UNITED KINGDOM GEOLOGICAL SOCIETY, 2012

As cargas de sedimentos podem ser divididas em dois grandes grupos que se subdividem em subgrupos. Estes subgrupos são a carga de arraste (conhecida como carga de fundo) que engloba partículas que são mobilizadas por deslizamento, rolamento ou saltação e o outro é a carga total em suspensão que engloba as partículas mais finas que são transportadas por suspensão ou turbidez (DOLVITSH, 2013). A figura 2 esquematiza a classificação dos tipos de transporte.

Figura 2 - Classificação do transporte de sedimentos



Fonte: DOLVITSH, 2013, P. 24

2.2.1.1 Rolamento

O transporte por rolamento acontece com partículas de formato arredondado, ou seja, com esfericidade próximo a 1, como pode ser observado na figura 1, nesta modalidade a partícula rola sem perder o contato com o solo. Este tipo de transporte acontece quando as forças hidrodinâmicas não conseguem vencer o peso das partículas. Quando essa força vence o peso da partícula o transporte se dá por saltação (SOUSA, 2011).

2.2.1.2 Deslizamento

O transporte por deslizamento acontece com partículas de formato lamelar, deslizando sem perder o contato com o leito do rio (figura 1). Neste regime o escoamento não possui energia suficiente para tirar a partícula do contato com o solo. Portanto geralmente ocorre em escoamentos com regime lamelar ou pouco

turbulentos, pois em regimes predominantemente turbulentos pode ser gerado uma saltação na partícula (SOUSA, 2011).

2.2.1.3 Saltação

Neste tipo de transporte o escoamento possui uma energia tal que consiga desprender a partícula do leito do rio, o regime de transporte possui características intermediárias, e as partículas se deslocam ora em suspensão ora em arraste, provocando saltos, como pode ser observado na figura 1 (PORTUGUÊS, 2008).

2.2.1.4 Suspensão

Segundo Português (2008) o transporte em suspensão desloca apenas partículas finas, ou seja, partículas em que o escoamento consegue manter em suspensão por longos períodos de tempo devido ao peso do grão ser pequeno. Quando o escoamento perde energia as partículas se depositam no leito, podendo serem transportados por outra modalidade de condução ou novamente em suspensão.

2.2.1.5 Turbidez

De acordo com Dolvitsch (2013) neste tipo de transporte os sedimentos se encontram dispersos dentro do fluido. Sendo que esta junção de água e partícula dificilmente é quebrada, mesmo quando a velocidade diminui, o sedimento continua disperso na água e provavelmente não se desprenderá (figura 1).

2.3 PARÂMETROS PARA CÁLCULO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para utilização dos métodos de cálculo do transporte de sedimentos, que usam fórmulas matemáticas, deve-se obter alguns parâmetros anteriormente, sendo que eles podem estar ligados tanto aos sedimentos quanto ao fluido que constitui o escoamento. As principais características são: peso específico, forma da partícula, dimensão do sedimento e a velocidade de sedimentação.

2.3.1 Dimensão geométrica

Como a forma das partículas sedimentares é irregular, há uma dificuldade na definição da dimensão dos grãos existentes nos leitos aluvionares. Podem ser definidos quanto ao diâmetro nominal que corresponde ao diâmetro de uma esfera de densidade e volume iguais aos da partícula, pelo diâmetro de sedimentação, correspondente a uma esfera de igual densidade, que no mesmo fluido apresenta uma velocidade de queda igual à da partícula, ou pelo diâmetro de peneiração, que

é o mais usual e corresponde ao diâmetro de uma esfera que, como a partícula passa sem folga pelo quadrado interior da rede da peneira (CARDOSO, 1998)

As partículas sedimentares podem ser classificadas em função das respectivas dimensões. Na tabela abaixo encontram-se as designações de algumas classes de sedimentos consoante os limites de separação, conforme o diâmetro de peneiração.

Tabela 1 – Classificação das partículas sedimentares segundo o diâmetro de peneiração

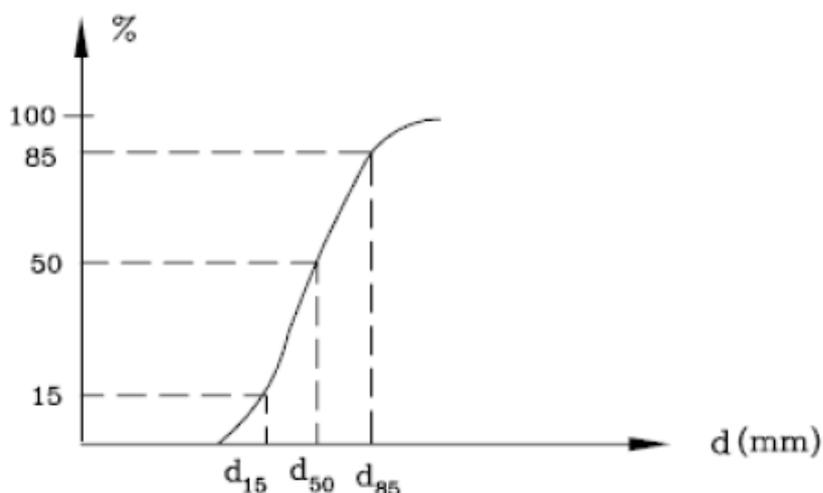
Classe	Gama de diâmetros de peneiração
Argila	0,24 µm a 4 µm
Silte	4 µm a 62 µm
Areia	62 µm a 2 mm
Seixo	2 mm a 64 mm
Calhau	> 64 mm

Fonte: Cardoso, 1998

Os materiais mais comuns nos cursos d'água são a areia e os seixos, que apresentam diâmetros respectivamente, entre 62 µm e 2 mm e entre 2 mm e 64 mm (CARDOSO, 1998).

O mais útil e conveniente método para a análise do tamanho das partículas é a utilização da curva de distribuição granulométrica. A partir desta curva, é possível retirar os vários diâmetros de peneiração, que correspondem ao diâmetro de peneiração tal que n% em peso é mais fino, como se pode observar na figura abaixo (LIU, 2001 APUD PORTUGUÊS, 2008).

Figura 3 - Distribuição granulométrica dos sedimentos



Fonte: Liu, 2001 apud Português, 2008

2.3.2 Forma do sedimento

A forma das partículas sedimentares tem importância por influenciar a sua velocidade de transporte nos leitos fluviais, o tipo de transporte e a velocidade de queda (CARDOSO, 2008).

A esfericidade é um dos parâmetros de forma de maior relevância, definida como a razão entre a área da superfície de uma esfera de volume igual ao de uma partícula e a área da superfície dessa partícula. Para partículas esféricas, a esfericidade é 1,0 e para todas as outras a esfericidade é inferior. O valor habitual para a forma dos sedimentos correspondente a areias naturais é de 0,7 (CHANG, 1998).

2.3.3 Velocidade de sedimentação

Segundo LIU (2001) apud Português (2008) “A velocidade de queda das partículas corresponde ao valor constante da velocidade adquirida pelas partículas quando o somatório das forças que lhes estão aplicadas é igual à zero”. Também influencia outras características do sedimento por ser uma medida de dissipação da energia de movimentação do sedimento em relação ao fluido.

2.3.4 Massa específica

Este parâmetro depende da composição mineralógica do sedimento. Porém a bibliografia mensura um intervalo de variação para alguns sedimentos, como pode ser observado na tabela abaixo. A massa específica pode ser definida como o peso

do sedimento dividido pelo volume ocupado por ele, já a massa específica é a massa dividido pelo volume.

Tabela 2 – Massa específica de alguns materiais

Material	Massa específica (Kg/m³)
Areia seca	1300 a 1600
Areia úmida	1700 a 2300
Areia fina seca	1500
Areia grossa seca	1800

Fonte: <http://prodetec.com.br>

2.4 IDENTIFICAÇÃO DO TIPO DE TRANSPORTE

Com o objetivo de realizar estudos de caso, é necessário identificar quando ocorre cada um dos tipos de transporte de sedimentos expostos nas classificações descritas anteriormente. Para este fim existem alguns modelos aplicados na definição da modalidade de transporte ao qual os sedimentos estão submetidos (DOUVITSCH, 2013).

2.4.1 Modelo Proposto por RAUDKIVI 1990 apud BARCELOS 2005

O critério de identificação da modalidade de transporte proposto por Raudkivi (1990) define que:

$$\text{Transporte} = \frac{w}{u^*} \quad (1)$$

Onde:

W = velocidade de queda da partícula (m/s);

u* = velocidade de cisalhamento dos grãos relativo ao fundo (m/s);

Velocidade de queda para partículas < 0,1mm devido a Stokes

$$w = \left(\frac{1}{18} \right) \cdot \left[\frac{(s-1)g \cdot D^2}{\nu} \right] \quad (2)$$

Sendo:

W = velocidade de queda das partículas (m/s)

g = 9,81m/s² aceleração da gravidade

D = diâmetro médio das partículas (m)

$$S = 2,65$$

$$\nu = \text{viscosidade cinemática (m}^2/\text{s)} = 0,0000102 \text{ m}^2/\text{s}$$

Velocidade de queda para partículas $\geq 0,1\text{mm}$ devido a Rubey, 1933

$$w = \frac{\left(\frac{2}{3} \cdot g \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma - 1} \cdot D^3 + 36 \cdot \nu^2 \right)^{0,5} - 6\nu}{D} \quad (3)$$

Sendo:

W = velocidade de queda da partícula (m/s)

g = 9,81 m/s² aceleração da gravidade

D = diâmetro da partícula (m)

$$\nu = \text{viscosidade cinemática (m}^2/\text{s)} = 0,0000102 \text{ m}^2/\text{s}$$

γ_s = peso específico da água = 1000 kg/m³

γ = peso específico do sedimento

Para partículas maiores que 2 mm, Yang, 2003 mostra uma equação para velocidade de queda a temperatura de 16°C.

$$W = 3,32 \cdot d^{0,5} \quad (4)$$

Sendo:

W = velocidade de queda da partícula (m/s)

d = diâmetro da partícula (m)

Velocidade de cisalhamento dos grãos relativo ao fundo (u^*)

$$u^* = (9,81 \cdot Rh \cdot S)^{0,5} \quad (5)$$

Sendo:

u^* = velocidade de cisalhamento dos grãos (m/s)

Rh = raio hidráulico da seção (m)

S = declividade da linha de água e que podemos fazer coincidir com a declividade do rio (m/m).

A classificação dentre as diferentes modalidades de transporte é obtida a partir dos seguintes parâmetros:

a) suspensão quando $0 < \frac{w}{u^*} < 0,6$;

b) saltação quando $0,6 < \frac{w}{u^*} < 2,0$;

c) arraste quando $2,0 < \frac{w}{u^*} < 6,0$.

Já LEEDER (2011) adota intervalos diferentes:

- a) suspensão quando $0 < \frac{w}{u^*} < 0,8$;
- b) saltação quando $0,8 < \frac{w}{u^*} < 2,0$;
- c) arraste quando $2,0 < \frac{w}{u^*} < 6,0$.

Como pôde-se observar, surgem intervalos sobrepostos, que dependendo das tensões exercidas pela água e a tensão cisalhante hidráulica crítica, partículas podem estar em dois intervalos ao mesmo tempo, suspensão e saltação.

Após definir qual o tipo de transporte com o qual se está trabalhando, é necessário avaliar e escolher qual o melhor modelo matemático para estimar o transporte de sedimentos.

2.5 ASSOREAMENTO

O Brasil possui uma das maiores redes fluviais do mundo, de grande importância no desenvolvimento do país no que se diz respeito ao abastecimento de água, geração de energia hidráulica, navegação, irrigação e etc. A utilização desses recursos hídricos exige o conhecimento do regime fluvial, o que é feito através da rede fluviométrica e estudos subsequentes (CARDOSO, 1998).

A operação e manutenção dessa rede inclui a obtenção de níveis d'água, descarga líquida, descarga sólida, e parâmetros de qualidade da água. Isso é feito de forma contínua com registradores ou operação diária por observadores locais e periodicamente pelas equipes de hidrometria (CARDOSO, 1998).

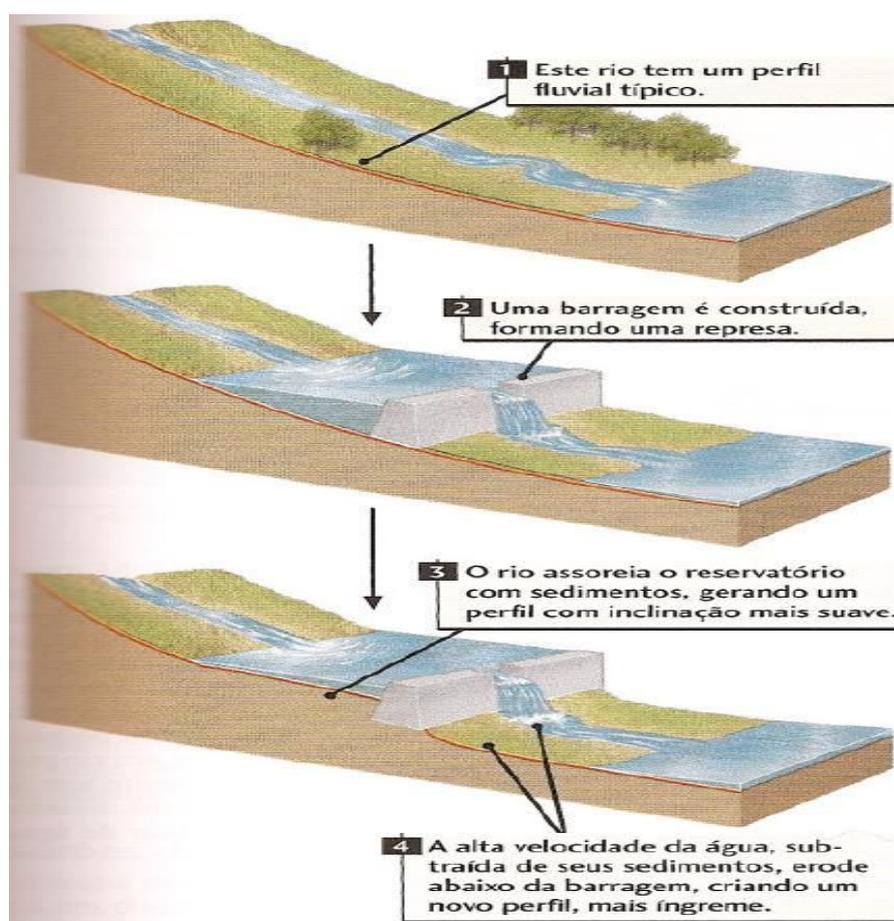
De acordo com o Banco de informações da Aneel em 2008 o Brasil tinha 75,68 % da energia elétrica gerada por usinas hidrelétricas. Dando mais força a importância dos estudos sedimentológicos para que seja mitigado os efeitos de assoreamento em reservatórios.

Medidas para mitigação dos efeitos do assoreamento geralmente são realizados por meios mecânicos, como a dragagem. A partir do conhecimento das principais áreas de produção de sedimentos, são analisadas medidas preventivas.

As perdas anuais de volume dos reservatórios brasileiros são de aproximadamente 0,5% (CARVALHO, 2000).

Na atualidade, um grande número de reservatórios brasileiros se encontra total ou parcialmente assoreados, principalmente os de pequeno e médio porte. Isto acontece devido ao fato de não se considerar o potencial de erosão das bacias hidrográficas, bem como os estudos prospectivos sobre o processo de sedimentação que ocorre nos reservatórios, ampliando-se dessa forma, a probabilidade de vida útil dos mesmos (CARVALHO, 2000).

Figura 4 - Mudança da dinâmica e do nível da base de um rio causada pela construção de uma barragem



Fonte: PRESS; SIEVER; GROTZINGER E JORDAN, 2006

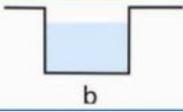
2.6 Canais hidráulicos

2.6.1 Elementos geométricos de um canal hidráulico

- Seção transversal: é a seção plana do conduto, normal a direção do escoamento;
- Área molhada: compreende a área ocupada pela água dentro do canal;
- Perímetro molhado: corresponde a soma dos comprimentos (fundo e talude) que está em contato com a água.

A figura 5 mostra as fórmulas para o cálculo de um canal de geometria retangular.

Figura 5 - Geometria de um canal retangular

Geometria da Seção	Área Molhada (A_m)	Perímetro Molhado (P_m)	Raio Hidráulico (R_H)	Largura Superficial (B)
	$b \cdot h$	$b+2h$	$\frac{b \cdot h}{b+2h}$	b

Fonte: <http://wiki.urca.br/dcc/lib/exe/fetch.php?media=canais.pdf>

2.6.2 Características de um canal hidráulico

- Largura superficial: é a largura da superfície do canal em contato com a atmosfera;
- Profundidade hidráulica: é a razão entre a área molhada e a largura superficial;
- Raio hidráulico: é a relação entre a área molhada e o perímetro molhado;
- Rugosidade: é determinada em função do revestimento;
- Declividade;
- Velocidade de escoamento:

$$V = C\sqrt{Rh.i} \quad (6)$$

Onde:

V – velocidade de escoamento (m/s)

Rh – raio hidráulico (m)

i – declividade do canal (m/m)

$$C = \frac{Rh^{1/6}}{n} \quad (7)$$

n – coeficiente de rugosidade (Manning)

- Vazão de escoamento:

$$Q = Rh^{2/3} \cdot A \cdot \sqrt{i} \cdot \frac{1}{n} \quad (8)$$

Onde:

- Q - vazão (m³/s)
- Rh - raio hidráulico (m)
- A – área molhada (m²)
- i – declividade (m/m)
- n – coeficiente de rugosidade (Manning)

$$Rh = A / P \quad (9)$$

- Rh - raio hidráulico (m)
- A – área molhada (m²)
- P – perímetro molhado (m)

2.7 MODELOS MATEMÁTICOS PARA CÁLCULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DA DESCARGA DE FUNDO

O objetivo básico dos modelos matemáticos criados é estabelecer uma relação entre a vazão de fluido e a quantidade de material transportada, quando observadas as peculiaridades de cada caso específico. Para isso, por meio de experimentos laboratoriais serão estudados quais modelos poderão ser utilizados.

Devido cada fórmula ter sido feita em intervalos de tempo diferente, cada autor considera parâmetros diferentes, porém o trabalho de Apsley e Stansby (2008) faz uma compatibilização dos métodos e consegue usar a mesma nomenclatura. No entanto é necessário obter 3 parâmetros adimensionais para obter os resultados, são eles:

Fluxo de carga de leito adimensional:

$$q^* = \frac{qb}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad (10)$$

Onde:

- q* = fator calculado em cada uma das fórmulas de cada modelo;
- qb = taxa de transporte de sedimento (que pode ser calculado nas seguintes unidades de medida Kg/m²*s ou m³/m²*s).
- $s = \frac{\rho_s}{\rho}$, onde
- ρ_s é a densidade do sedimento;
- ρ é a densidade da água;

- g = gravidade;
- d = diâmetro médio das partículas.

Tensão de cisalhamento adimensional ou Tensão Shields

A tensão Shields pode ser entendida como a tensão de arraste e pode ser exemplificada pela figura 6.

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{p(s-1)gd} \quad (11)$$

Onde:

- p é o peso específico da água;
- g é a aceleração da gravidade;
- s = densidade do sedimento / densidade da água;
- d = diâmetro médio das partículas do leito (do sedimento).
- T_b = Tensão de cisalhamento no leito (altura da lâmina de água x densidade da água x aceleração da gravidade x declividade do leito);

$$\tau_b = H \cdot p \cdot g \cdot i \quad (12)$$

Onde:

H = altura da lâmina de água

p = peso específico da água

g = aceleração da gravidade

i = declividade

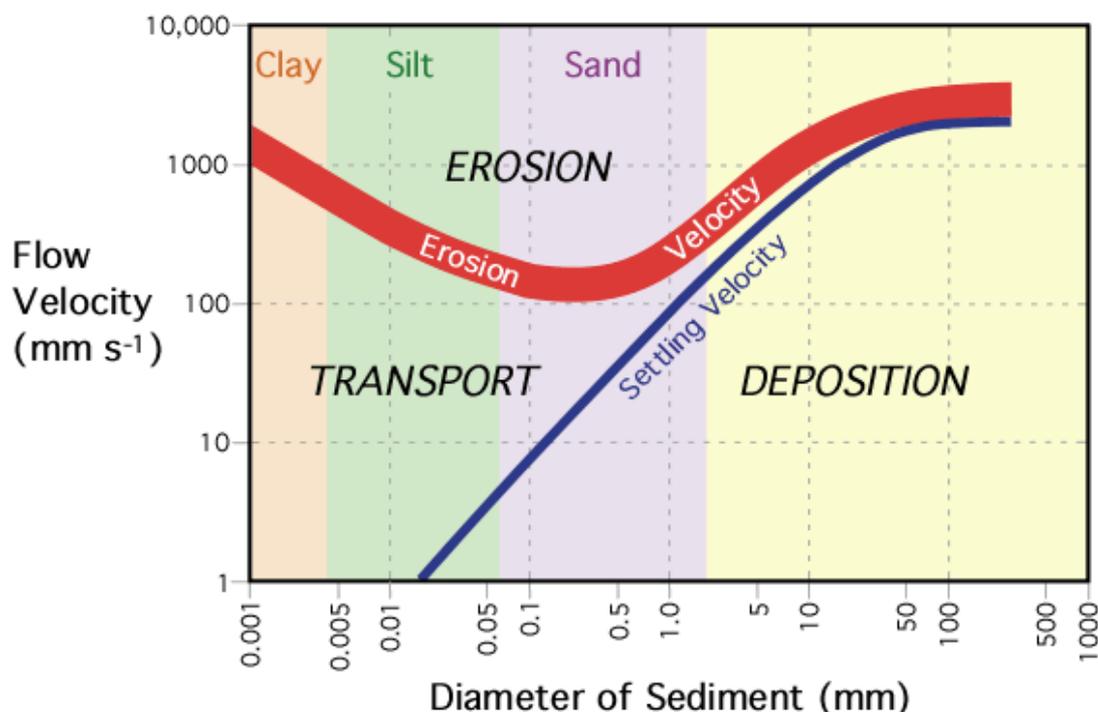
Diâmetro da partícula adimensional

$$d^* = d \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (13)$$

Sendo:

- d = diâmetro médio das partículas do leito (do sedimento);
- s = densidade do sedimento / densidade da água;
- g = aceleração da gravidade;
- ν = viscosidade cinemática da água.

Figura 6 - Diagrama de shields



Fonte: <<http://washingtonchampionsleague.com/wp-includes/pomo/hjulstrom-curve-explained>>, 2016

2.7.1 Modelo de Meyer-Peter e Muller (1948)

De acordo com SCAPIN et al (2007) a fórmula de *Meyer-Peter e Muller* (1948), usado no cálculo, foi desenvolvida a partir de diferentes experimentos variando o tamanho das partículas de areia ou usando areia de grãos de tamanhos uniformes, usando cascalho, lignita e barita.

De acordo com SCAPIN (2007) este modelo baseia-se nas seguintes hipóteses:

- a) Que a declividade da linha de energia é uma característica da interação entre o movimento sólido e o líquido de um escoamento com transporte de sedimentos. Uma dada porção de energia é consumida para o transporte sólido e a energia remanescente para o movimento líquido. Que os mesmos fenômenos governam o transporte de sedimentos e o início do movimento.
- b) A sua aplicação requer o conhecimento dos seguintes parâmetros: peso específico dos sedimentos, os diâmetros característicos do material de fundo, a declividade da linha de energia, a vazão em escoamento e a forma da seção transversal do canal.

A fórmula de Meyer Peter & Muller (1948), segundo o modelo adaptado de Apsley e Stansby (2008):

$$q^* = 8(\tau^* - \tau_{crit}^*)^{3/2} \quad (14)$$

Sendo:

$$\tau_{crit}^* = \frac{0,30}{1 + 1,2d^*} + 0,055[1 - \exp(-0,020d^*)] \quad (15)$$

τ_{crit}^* = na prática é assumido como 0,047

2.7.2 Modelo de Einstein-Brown (1950)

De acordo com SCAPIN et al (2007) desenvolveu um método para estimar a descarga de material de fundo, usando diferentes vazões, que são coletadas por meio de dados considerando a seção transversal e o material de fundo, de um trecho de rio, com escoamento uniforme.

O modelo original de Einstein-Brown de 1950 sofreu várias revisões, neste trabalho vamos usar o modelo adaptado por Apsley e Stansby (2008):

$$q^* = \frac{k \exp(-0,391/\tau^*)}{0,465}, \tau^* < 0,182 \quad (16)$$

$$q = 40k\tau^{*3}, \tau^* \geq 0,182$$

Sendo:

$$k = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36}{d^{*3}}} - \sqrt{\frac{36}{d^{*3}}} \quad (17)$$

- d^* = diâmetro médio das partículas

2.7.3 Modelo de Yalin (1963)

Muitos pesquisadores se comprometeram com a determinação da capacidade de transporte de sedimentos, sendo considerada pela maioria um estudo muito longo e complexo, porém, vamos usar o modelo adaptado por Apsley e Stansby (2008):

$$q^* = 0,635r\sqrt{\tau^*} \left[1 - \frac{1}{\sigma r} \ln(1 + \sigma r) \right] \quad (18)$$

Sendo:

$$r = \frac{\tau^*}{\tau_{crit}^*} - 1 \quad (19)$$

$$\sigma = 2,45 \sqrt{\frac{\tau^*_{crit.}}{s^{0,4}}} \quad (20)$$

Onde: s = densidade do sedimento / densidade da água;

Segundo Coiado e Paiva (2005, p. 8), este modelo foi definido para:

a) partículas com diâmetros uniformes, sendo que quando os diâmetros não são uniformes deve ser utilizado o diâmetro médio;

b) sedimentos com diâmetros que variaram entre 0,787 mm a 2,86 mm; O agregado do projeto tem diâmetro médio de 0,4mm.

c) a equação deve ser utilizada com cautela para amostras com desvio padrão geométrico superior a 3,0, funcionando melhor para desvios menores.

2.8 MODELOS MATEMÁTICOS PARA CÁLCULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE DESCARGA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

2.8.1 Método de Van Rijn (1984)

O modelo de Van Rijn de acordo com Apsley e Stansby (2008) usa a seguinte parâmetro adimensional.

$$q^* = \frac{0,053}{d^{*0,3}} \left(\frac{\tau^*}{\tau^*_{crit.}} - 1 \right)^{2,1} \quad (21)$$

2.8.2 Modelo matemático de Nielsen (1992)

A maioria das aproximações utilizadas para determinar a concentração de sedimento considera que a suspensão resulta apenas da difusão. No entanto, dados obtidos em escoamentos oscilatórios sobre fundos com ripples mostraram que a difusão pura não é adequada para simular a distribuição das diferentes frações do sedimento em suspensão, levando Nielsen (1992) a criar um modelo onde introduziu um novo termo para a suspensão de partículas.

Como usaremos o modelo de Apsley e Stansby (2008), a fórmula usada é a seguinte:

$$q^* = 12(\tau^* - \tau^*_{crit.})\sqrt{\tau^*} \quad (22)$$

3. METODOLOGIA

A pesquisa foi dividida em três partes. A primeira devido ao trabalho ter caráter qualitativo/quantitativo e ser do tipo descritivo, foi a pesquisa documental e/ou bibliográfica sobre o tema. A segunda foi usar os dados experimentais de um trabalho de conclusão de curso feito por Macedo, 2016 para obter parâmetros de entrada nas fórmulas pesquisadas e para servir de base comparativa de resultados. Finalmente, a terceira foi a análise de sensibilidade das incógnitas de cada modelo matemático.

Os modelos existentes para aplicação das fórmulas são: *Modelo de Meyer-Peter e Muller (1948)*, *Modelo de Einstein-Brown (1950)*, *Modelo de Yalin (1963)*, *Método de Van Rijn (1984)* e *Modelo matemático de Nielsen (1992)*, descritos no referencial teórico desse trabalho.

Cada modelo possui parâmetros específicos para o cálculo da taxa de transporte de sedimento. Portanto na primeira parte deste trabalho foi simulado um ensaio de laboratório, visando identificar o modelo que melhor consegue reproduzir as condições do ensaio, os dados de entrada foram adotados a partir do ensaio em canal hidráulico no CEULP/ULBRA realizado pelo acadêmico Macedo (2016) em defesa de Trabalho de conclusão de curso (A descrição completa do ensaio pode ser consultada no acervo da Biblioteca do Centro Universitário Luterano de Palmas).

O Trabalho de Macedo, 2016 consistia basicamente em medir a taxa de sedimento que fica retido ao final de um canal de 2,5m usando diferentes inclinações. Em cada caso foi medida a taxa de transporte de sedimento e a velocidade do fluxo da água e para garantir a repetibilidade, realizou-se o ensaio três vezes com a mesma inclinação, mas com tempos diferentes. Desta forma é possível identificar se foi alcançado um estado de equilíbrio, no qual, o fluxo da água erode uma quantidade constante de sedimento.

Ao obter o resultado usando os parâmetros do ensaio já citado, nas fórmulas dos cinco modelos matemáticos, foi feito um comparativo com o resultado obtido em canal hidráulico no estudo já mencionado, para então saber qual das fórmulas empíricas possuem o resultado mais parecido com o obtido no ensaio laboratorial.

E na terceira e última etapa do trabalho foi feito o estudo de sensibilidade que cada modelo possui quando se varia uma incógnita. O método probabilístico usado foi o método FOSM (índice de confiabilidade). De acordo com Assis (2002) os procedimentos sugeridos são os seguintes:

- A variância da taxa de transporte de sedimentos, $V [q]$, calculada por meio da formulação de primeira ordem e segundo momento (FOSM). O cálculo consiste na obtenção das parcelas de variância do $V [q]$ causadas por cada um dos parâmetros (*diâmetro da partícula, densidade do sedimento, altura da lâmina de água e declividade*) envolvida no cálculo de $[q]$. A avaliação destas parcelas estabelece a importância relativa de cada um dos parâmetros conduzindo as proposições de projeto.

Primeiramente deve ser feito uma pesquisa bibliográfica dos parâmetros para então definir a média e a variância, depois faz-se a análise da taxa de transporte de sedimentos $[q]$, com a fixação dos parâmetros médios.

Em seguida são efetuados os procedimentos para avaliação estatística da taxa de transporte de sedimentos $[q]$. Alguns símbolos são utilizados:

$E [x]$ é a média de x ;

$\sigma [x]$ é o desvio padrão de x ;

$V [x]$ é a variância de x , igual ao quadrado de $\sigma [x]$;

$CV [x]$ é o coeficiente de variação de x , igual a $\sigma [x]/ E[x]$;

$[q]$ é a taxa de transporte de sedimentos;

O valor da variância da taxa de transporte de sedimento, $V[q]$, é obtido na seguinte fórmula:

$$V[q] = \sum_1^n \left(\frac{\delta q_{ii}}{\delta X_i} \right)^2 x V [X_i] \quad (23)$$

Onde:

$V [q]$ é o quadrado do desvio padrão;

δq_{ii} é a variação de $[q]$ que ocorre quando se varia de δX_i cada um dos n parâmetros;

X_i média dos parâmetros;

$V[X_i]$ é a variância de cada um dos X_i .

A determinação dos valores de variância é feita através dos procedimentos estatísticos simples. Os dados de média e variância da tabela 3 serão coletados por meio pesquisa bibliográfica em documentos publicados, cada dado foi obtido da seguinte maneira:

- Altura da lâmina da água: Dissertação de BONATO (2008), quadro 3 – Características hidráulicas e geométricas da seção transversal da microbacia do Córrego Machado.

- Declividade: Foi mensurada por meio de imagem de satélite em um dado trecho do Córrego Buritizal.
- Densidade do sedimento: Foi usado valores encontrados a partir de ensaios feitos com material coletado na calha do córrego Machado.
- Diâmetro da partícula: Foi usado dados que serão coletados em campo na bacia do córrego Machado.

Tabela 3 – Tabela de parâmetros

Parâmetro	Média	Variância
Diâmetro da partícula		
Densidade do sedimento		
Altura da lâmina de água		
Declividade		

Fonte: Assis, 2002

Posteriormente podemos calcular a tabela abaixo que vai mensurar a sensibilidade que a taxa de sedimento terá quando se varia cada parâmetro individualmente.

Tabela 4 – Tabela de sensibilidade dos parâmetros

X_i	δX_i	$\delta[q]_{ii}$	$\frac{\delta[q]_{ii}}{\delta X_i}$	$V[X_i]$	$\left(\frac{\delta[q]_{ii}}{\delta X_i}\right)^2 \times V[X_i]$	
Total =				$V[q]$	Σ	$\Sigma\%$

Fonte: Assis, 2002

Onde:

X_i é a média;

δX_i é 10% do valor da média;

$\delta[q]_{ii}$ é a diferença entre o resultado da taxa de transporte calculada com a média (X_i) pelo resultado da taxa obtido usando o valor de δX_i ;

$V[X_i]$ Variância da média.

O parâmetro que obter maior porcentagem é aquele que tem maior influência na resposta quando variado na fórmula da taxa de transporte de sedimentos. Esta análise foi feita para cada modelo matemático.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Um dos objetivos do presente trabalho é comparar o resultado obtido em laboratório por Macedo (2016) com o resultado calculado usando modelos matemáticos já citados, os dados de entrada nas fórmulas são àqueles coletados em laboratório por Macedo (2016). Portanto foi obtido os resultados para cada ensaio realizado em laboratório onde cada um deles se diferencia por usar declividade e/ou tempo de ensaio diferente, posteriormente gerou-se gráficos em barras para ter uma melhor visualização do resultado.

4.1.1. ENSAIO 01 (Inclinação 0,5% e Tempo de 300 segundos)

Quadro 1 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 01

VARIÁVEIS DE ENTRADA		
Massa específica do sedimento=	2269	Kg/m ³
Gravidade =	9,81	m/s ²
S ($\chi_{\text{sedimento}}/\chi_{\text{água}}$) =	2,269	
Diâmetro médio das partículas=	0,0004	m
Altura da lâmina da água =	0,0178	m
Massa específica da água =	1000	Kg/m ³
Declividade =	0,005	
Viscosidade cinem. Da água	0,000001	m ² /s

TENSÃO DE CISALHAMENTO NO LEITO (T_b)

T _b =	0,873	kg/m.s ²
------------------	-------	---------------------

DIÂMETRO DA PARTÍCULA ADIMENSIONAL

D* =	9,271
------	-------

TENSÃO SHIELDS

T* =	0,175
------	-------

Fonte: Próprio autor

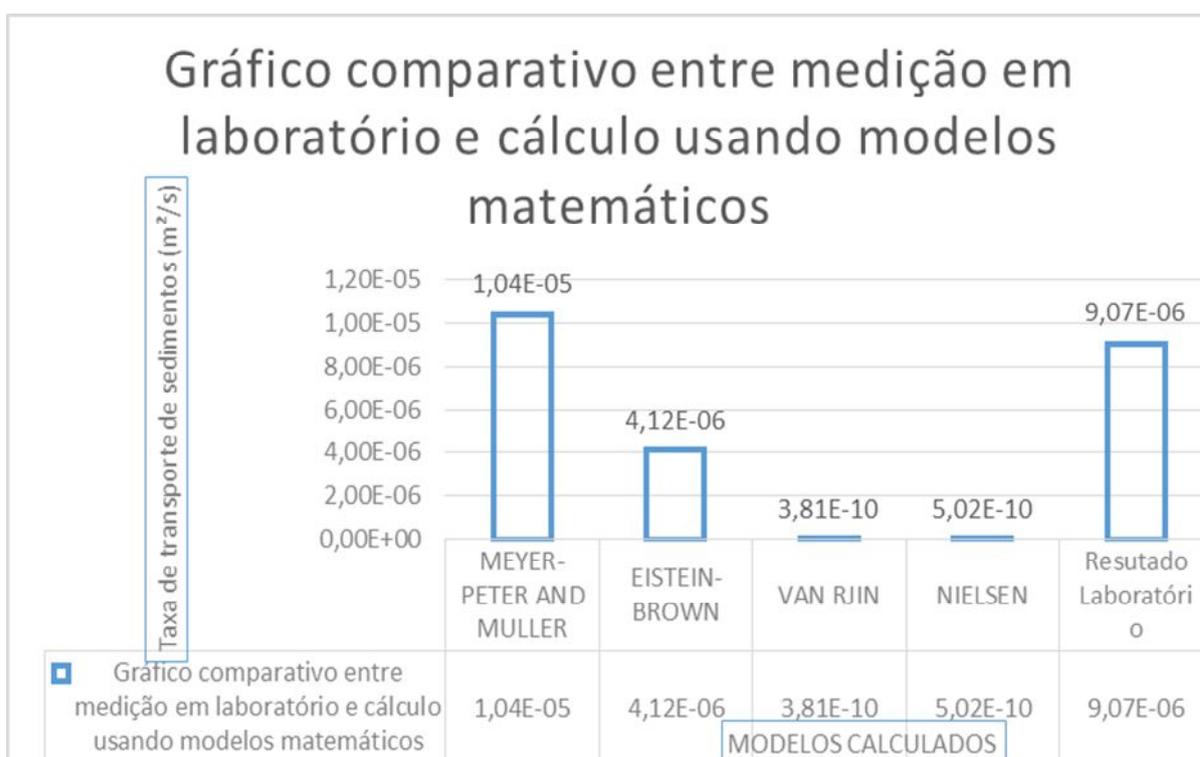
Quadro 2 - Resultados para ensaio 01

Resultado (qb)			
Modelo	Unidade	Valor	Variação %*
MEYER-PETER AND MULLER	m ² /s	1,04E-05	1,33E-06
EISTEIN-BROWN	m ² /s	4,12E-06	-4,95E-06
YALIN	m ² /s	2,90E-04	2,81E-04
VAN RJIN	m ² /s	3,81E-10	-9,07E-06
NIELSEN	m ² /s	5,02E-10	-9,07E-06
RESULTADO LABORATÓRIO	m ² /s	9,07E-06	Referência

*Resultado da diferença entre o valor obtido em métodos matemáticos e o valor medido em laboratório

Fonte: Próprio autor

Figura 7 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos



Fonte: Próprio autor

Após o processamento dos resultados, observou-se que o modelo de Yalin estima valores muito acima do valor experimental e do valor estimado pelos outros quatro modelos matemáticos. Por esse motivo, para facilitar a visualização, o resultado do modelo de Yalin não é plotado nos gráficos.

4.1.2. ENSAIO 02 (Inclinação 1,0% e Tempo de 300 segundos)

Quadro 3 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 02

VARIÁVEIS DE ENTRADA		
Massa específica do sedimento=	2269	Kg/m ³
Gravidade =	9,81	m/s ²
S ($\chi_{\text{sedimento}}/\chi_{\text{água}}$) =	2,269	
Diâmetro médio das partículas=	0,0004	m
Altura da lâmina da água =	0,0178	m
Massa específica da água =	1000	Kg/m ³
Declividade =	0,01	
Viscosidade cinem. Da água	0,000001	m ² /s

TENSÃO DE CISALHAMENTO NO LEITO (Tb)

Tb =	1,746	kg/m.s ²
------	-------	---------------------

DIÂMETRO DA PARTÍCULA ADIMENSIONAL

D* =	9,271
------	-------

TENSÃO SHIELDS

T* =	0,351
------	-------

Fonte: Próprio autor

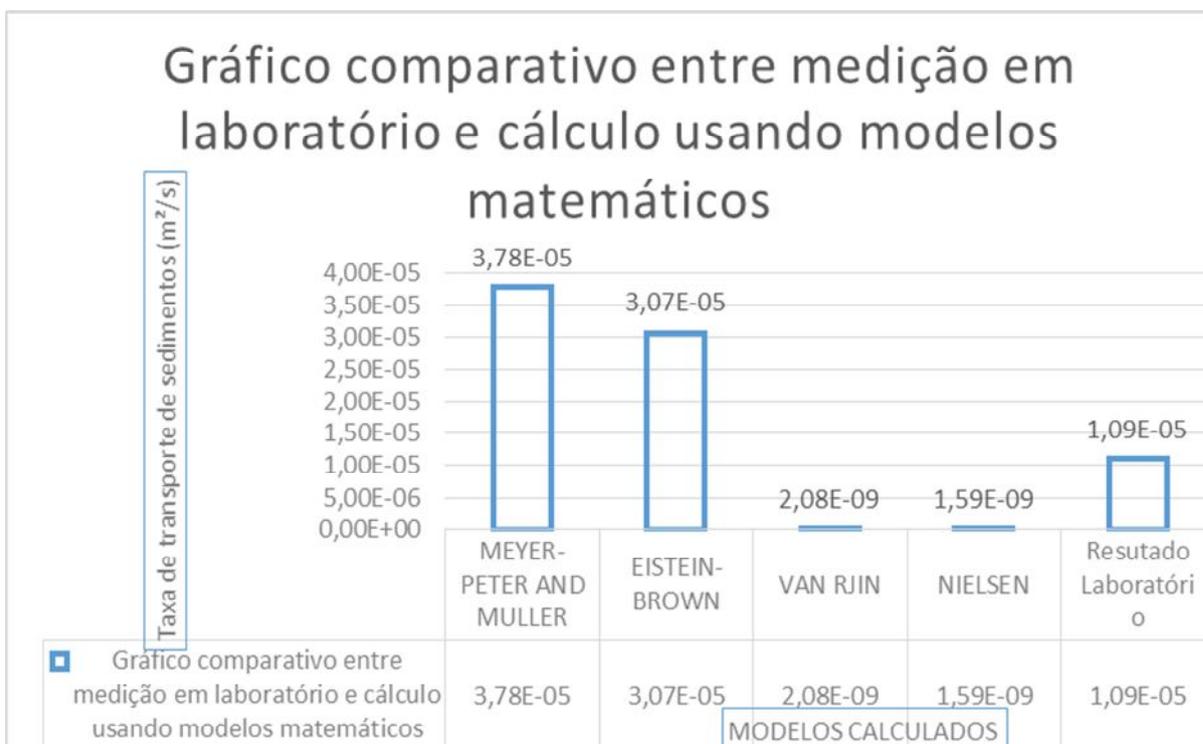
Quadro 4 - Resultados para ensaio 02

Resultado (qb)			
Modelo	Unidade	Valor	Variação %*
MEYER-PETER AND MULLER	m ² /s	3,78E-05	2,69E-05
EISTEIN-BROWN	m ² /s	3,07E-05	1,98E-05
YALIN	m ² /s	3,54E-03	3,53E-03
VAN RJJIN	m ² /s	2,08E-09	-1,09E-05
NIELSEN	m ² /s	1,59E-09	-1,09E-05
RESULTADO LABORATÓRIO	m ² /s	1,09E-05	Referência

*Resultado da diferença entre o valor obtido em métodos matemáticos e o valor medido em laboratório

Fonte: Próprio autor

Figura 8 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos



Fonte: Próprio autor

4.1.3. ENSAIO 03 (Inclinação 1,5% e Tempo de 300 segundos)

Quadro 5 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 03

VARIÁVEIS DE ENTRADA		
Massa específica do sedimento=	2309	Kg/m ³
Gravidade =	9,81	m/s ²
S ($\chi_{\text{sedimento}}/\chi_{\text{água}}$) =	2,309	
Diâmetro médio das partículas=	0,0004	m
Altura da lâmina da água =	0,0151	m
Massa específica da água =	1000	Kg/m ³
Declividade =	0,015	
Viscosidade cinem. Da água	0,000001	m ² /s

TENSÃO DE CISALHAMENTO NO LEITO (Tb)

Tb =	2,222	kg/m.s ²
------	-------	---------------------

DIÂMETRO DA PARTÍCULA ADIMENSIONAL

D* =	9,367
------	-------

TENSÃO SHIELDS

T* =	0,433
------	-------

Fonte: Próprio autor

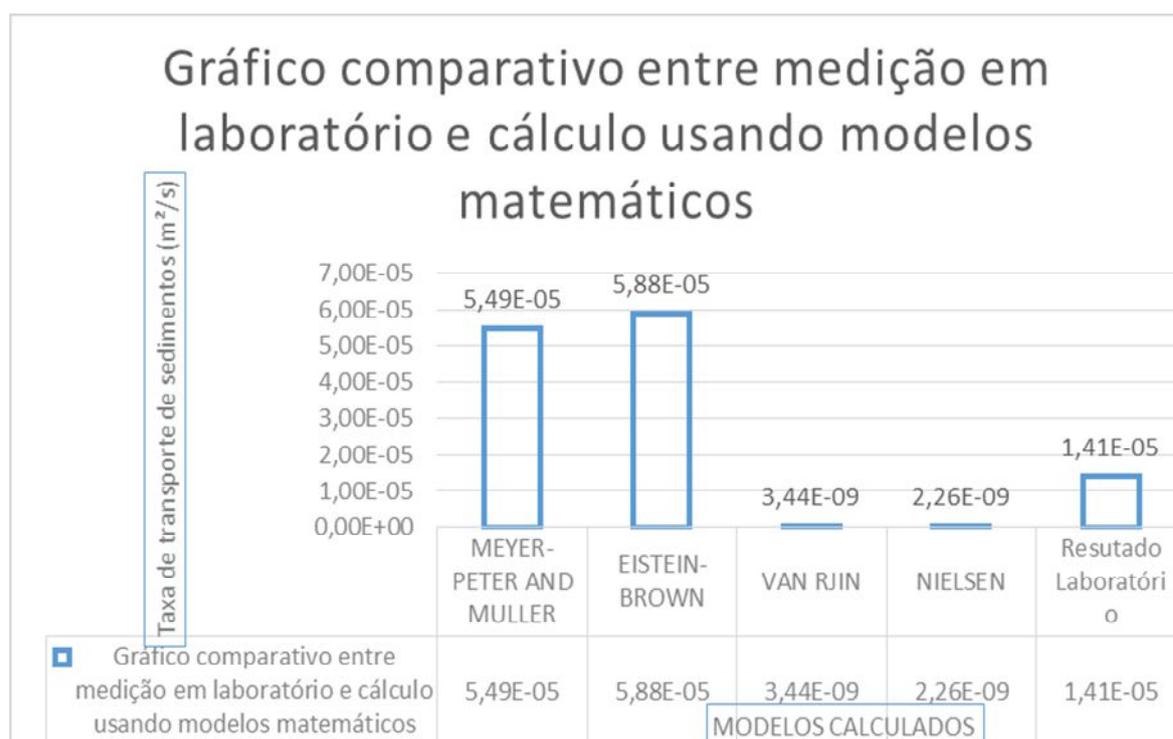
Quadro 6 - Resultados para ensaio 03

Resultado (qb)			
Modelo	Unidade	Valor	Variação %*
MEYER-PETER AND MULLER	m ² /s	5,49E-05	4,08E-05
EISTEIN-BROWN	m ² /s	5,88E-05	4,47E-05
YALIN	m ² /s	7,26E-03	7,25E-03
VAN RJIN	m ² /s	3,44E-09	-1,41E-05
NIELSEN	m ² /s	2,26E-09	-1,41E-05
RESULTADO LABORATÓRIO	m ² /s	1,41E-05	Referência

*Resultado da diferença entre o valor obtido em métodos matemáticos e o valor medido em laboratório

Fonte: Próprio autor

Figura 9 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos



Fonte: Próprio autor

4.1.4. ENSAIO 04 (Inclinação 0,5% e Tempo de 60 segundos)

Quadro 7 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 04

VARIÁVEIS DE ENTRADA		
Massa específica do sedimento=	2279	Kg/m ³
Gravidade =	9,81	m/s ²
S ($\lambda_{\text{sedimento}}/\lambda_{\text{água}}$) =	2,279	
Diâmetro médio das partículas=	0,0004	m
Altura da lâmina da água =	0,0162	m
Massa específica da água =	1000	Kg/m ³
Declividade =	0,005	
Viscosidade cinem. Da água	0,000001	m ² /s

TENSÃO DE CISLHAMENTO NO LEITO (Tb)

Tb =	0,795	kg/m.s ²
------	-------	---------------------

DIÂMETRO DA PARTÍCULA ADIMENSIONAL

D* =	9,295
------	-------

TENSÃO SHIELDS

T* =	0,158
------	-------

Fonte: Próprio autor

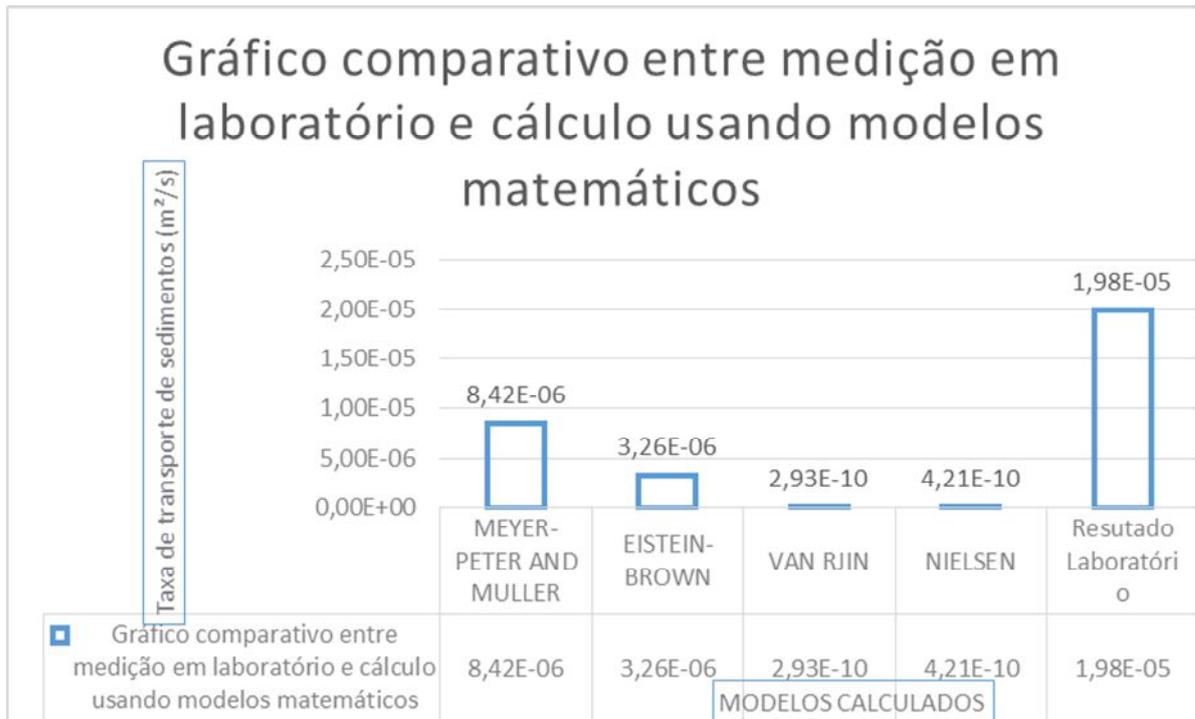
Quadro 8 - Resultados para ensaio 04

Resultado (qb)			
Modelo	Unidade	Valor	Varição %*
MEYER-PETER AND MULLER	m ² /s	8,42E-06	-1,14E-05
EISTEIN-BROWN	m ² /s	3,26E-06	-1,65E-05
YALIN	m ² /s	1,93E-04	1,73E-04
VAN RJJIN	m ² /s	2,93E-10	-1,98E-05
NIELSEN	m ² /s	4,21E-10	-1,98E-05
RESULTADO LABORATÓRIO	m ² /s	1,98E-05	Referência

*Resultado da diferença entre o valor obtido em métodos matemáticos e o valor medido em laboratório

Fonte: Próprio autor

Figura 10 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos



Fonte: Próprio autor

4.1.5. ENSAIO 05 (Inclinação 1,0% e Tempo de 60 segundos)

Quadro 9 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 05

VARIÁVEIS DE ENTRADA		
Massa específica do sedimento=	2271	Kg/m ³
Gravidade =	9,81	m/s ²
S ($\chi_{\text{sedimento}}/\chi_{\text{água}}$) =	2,271	
Diâmetro médio das partículas=	0,0004	m
Altura da lâmina da água =	0,0171	m
Massa específica da água =	1000	Kg/m ³
Declividade =	0,01	
Viscosidade cinem. Da água	0,000001	m ² /s

TENSÃO DE CISALHAMENTO NO LEITO (Tb)

Tb =	1,678	kg/m.s ²
------	-------	---------------------

DIÂMETRO DA PARTÍCULA ADIMENSIONAL

D* =	9,275
------	-------

TENSÃO SHIELDS

T* =	0,336
------	-------

Fonte: Próprio autor

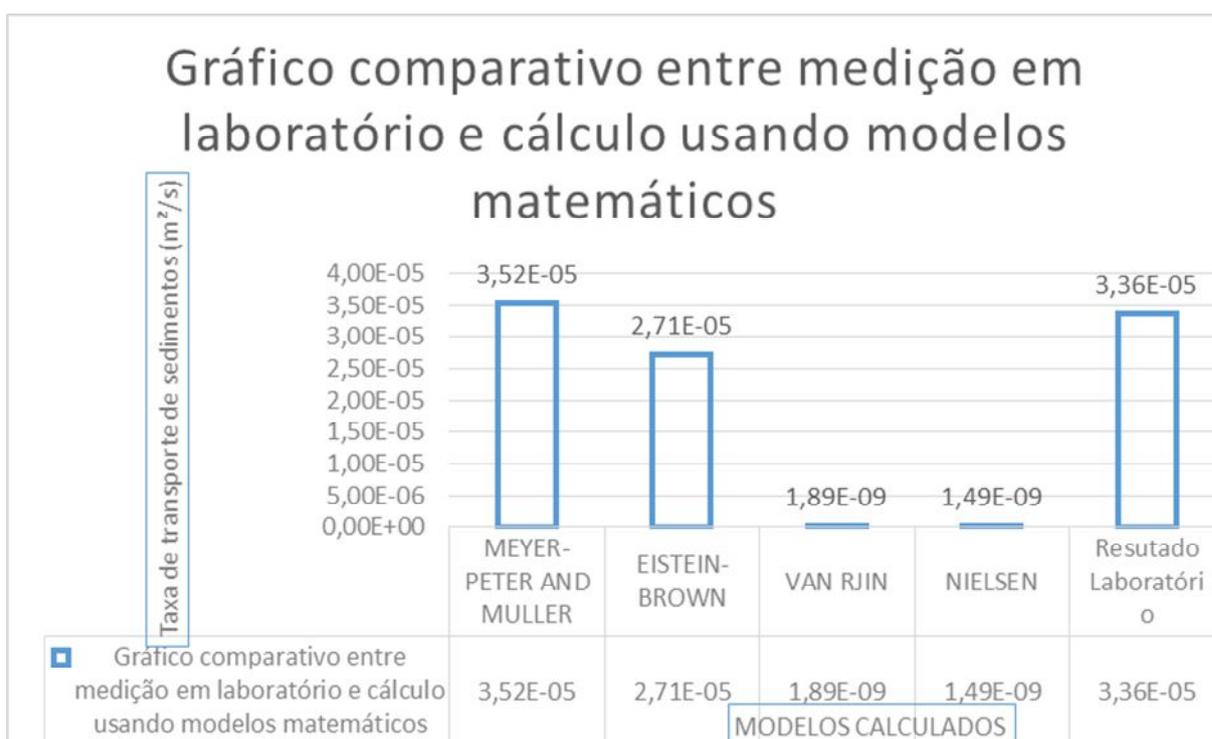
Quadro 10 - Resultados para ensaio 05

Resultado (qb)			
Modelo	Unidade	Valor	Variação %*
MEYER-PETER AND MULLER	m ² /s	3,52E-05	1,60E-06
EISTEIN-BROWN	m ² /s	2,71E-05	-6,50E-06
YALIN	m ² /s	3,08E-03	3,05E-03
VAN RJIN	m ² /s	1,89E-09	-3,36E-05
NIELSEN	m ² /s	1,49E-09	-3,36E-05
RESULTADO LABORATÓRIO	m ² /s	3,36E-05	Referência

*Resultado em % da diferença entre o valor obtido em métodos matemáticos e o valor medido em laboratório

Fonte: Próprio autor

Figura 11 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos



Fonte: Próprio autor

4.1.6. ENSAIO 06 (Inclinação 1,5% e Tempo de 60 segundos)

Quadro 11 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 06

VARIÁVEIS DE ENTRADA		
Massa específica do sedimento=	2317	Kg/m ³
Gravidade =	9,81	m/s ²
S ($\chi_{\text{sedimento}}/\chi_{\text{água}}$) =	2,317	
Diâmetro médio das partículas=	0,0004	m
Altura da lâmina da água =	0,0171	m
Massa específica da água =	1000	Kg/m ³
Declividade =	0,015	
Viscosidade cinem. Da água	0,000001	m ² /s

TENSÃO DE CISLHAMENTO NO LEITO (Tb)

Tb =	2,516	kg/m.s ²
------	-------	---------------------

DIÂMETRO DA PARTÍCULA ADIMENSIONAL

D* =	9,386
------	-------

TENSÃO SHIELDS

T* =	0,487
------	-------

Fonte: Próprio autor

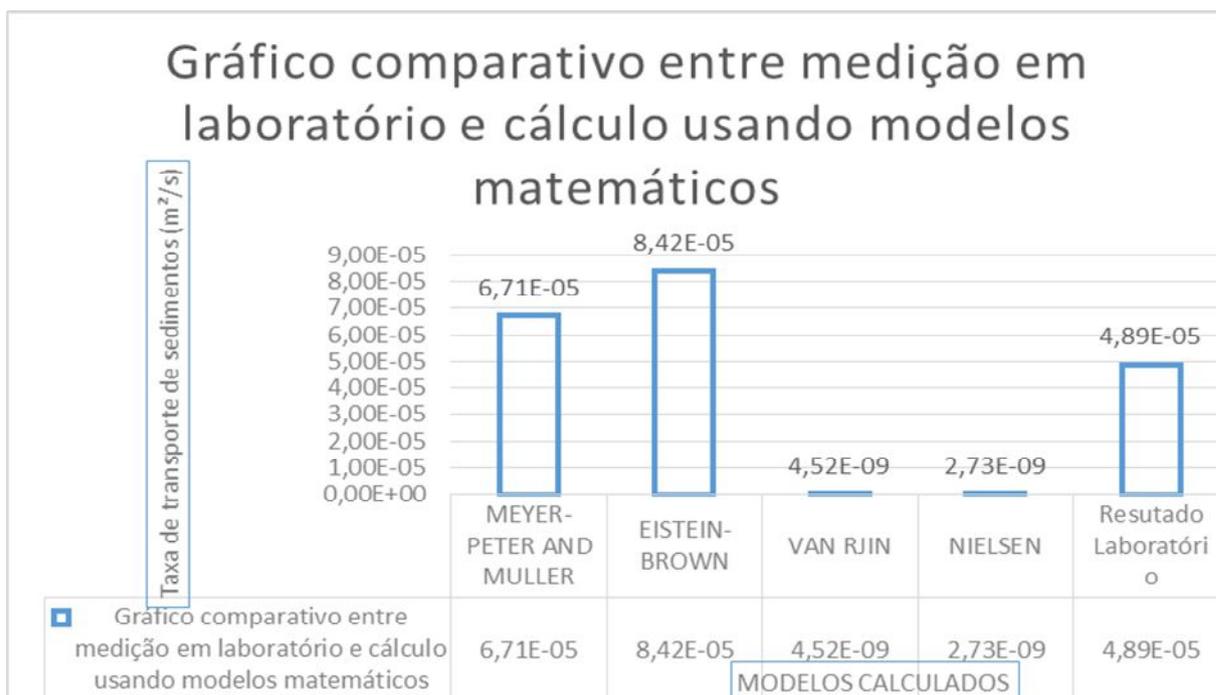
Quadro 12 - Resultados para ensaio 06

Resultado (qb)			
Modelo	Unidade	Valor	Variação %*
MEYER-PETER AND MULLER	m ² /s	6,71E-05	1,82E-05
EISTEIN-BROWN	m ² /s	8,42E-05	3,53E-05
YALIN	m ² /s	1,07E-02	1,07E-02
VAN RJJIN	m ² /s	4,52E-09	-4,89E-05
NIELSEN	m ² /s	2,73E-09	-4,89E-05
RESULTADO LABORATÓRIO	m ² /s	4,89E-05	Referência

*Resultado em % da diferença entre o valor obtido em métodos matemáticos e o valor medido em laboratório

Fonte: Próprio autor

Figura 12 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos



Fonte: Próprio autor

4.1.7. ENSAIO 07 (Inclinação 0,5% e Tempo de 600 segundos)**Quadro 13 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 07**

VARIÁVEIS DE ENTRADA		
Massa específica do sedimento =	2317	Kg/m ³
Gravidade =	9,81	m/s ²
S ($\chi_{\text{sedimento}}/\chi_{\text{água}}$) =	2,329	
Diâmetro médio das partículas =	0,0004	m
Altura da lâmina da água =	0,0171	m
Massa específica da água =	1000	Kg/m ³
Declividade =	0,005	
Viscosidade cinem. Da água	0,000001	m ² /s

TENSÃO DE CISLHAMENTO NO LEITO (Tb)

Tb =	0,839	kg/m.s ²
------	-------	---------------------

DIÂMETRO DA PARTÍCULA ADIMENSIONAL

D* =	9,386
------	-------

TENSÃO SHIELDS

T* =	0,162
------	-------

Fonte: Próprio autor

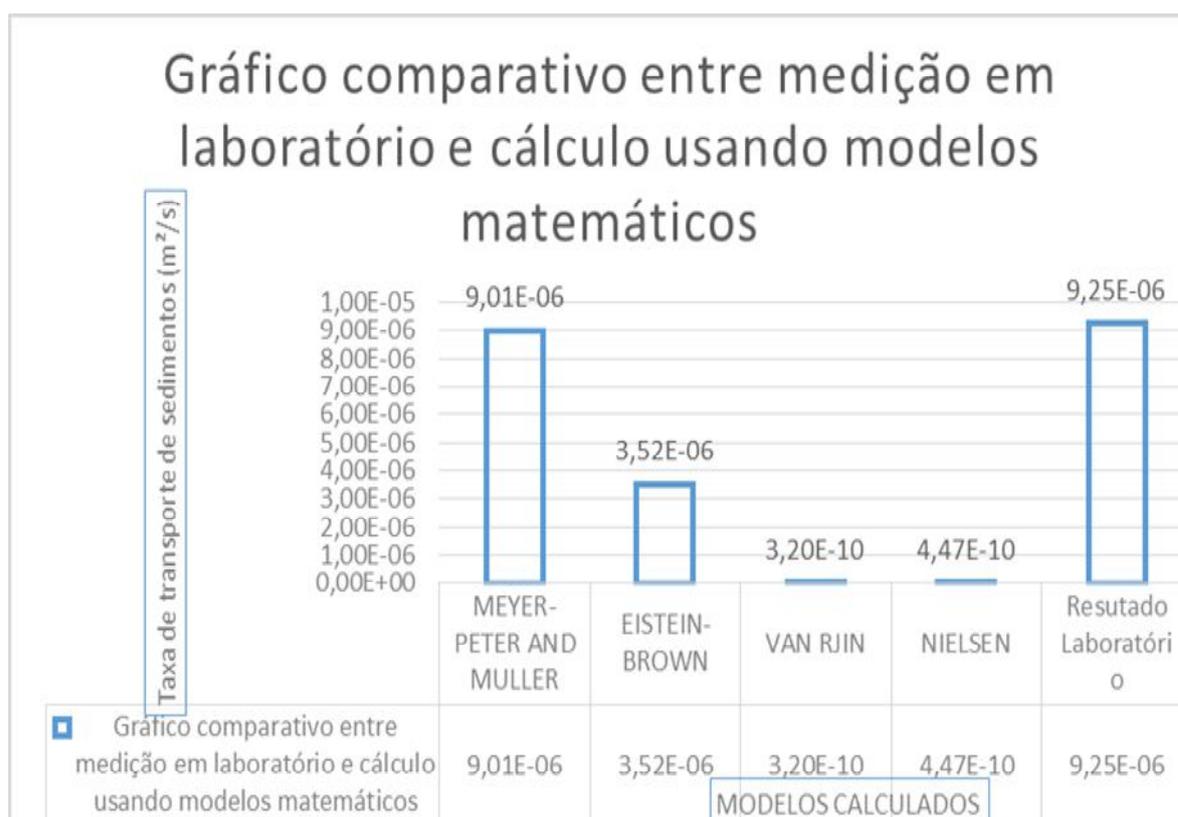
Quadro 14 - Resultados para ensaio 07

Resultado (qb)			
Modelo	Unidade	Valor	Variação %*
MEYER-PETER AND MULLER	m ² /s	9,01E-06	-2,40E-07
EISTEIN-BROWN	m ² /s	3,52E-06	-5,73E-06
YALIN	m ² /s	2,20E-04	2,11E-04
VAN RJIN	m ² /s	3,20E-10	-9,25E-06
NIELSEN	m ² /s	4,47E-10	-9,25E-06
RESULTADO LABORATÓRIO	m ² /s	9,25E-06	Referência

*Resultado em % da diferença entre o valor obtido em métodos matemáticos e o valor medido em laboratório

Fonte: Próprio autor

Figura 13 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos



Fonte: Próprio autor

4.1.8. ENSAIO 08 (Inclinação 1,0% e Tempo de 600 segundos)

Quadro 15 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 08

VARIÁVEIS DE ENTRADA		
Massa específica do sedimento=	2362	Kg/m ³
Gravidade =	9,81	m/s ²
S ($\lambda_{\text{sedimento}}/\lambda_{\text{água}}$) =	2,362	
Diâmetro médio das partículas=	0,0004	m
Altura da lâmina da água =	0,0165	m
Massa específica da água =	1000	Kg/m ³
Declividade =	0,01	
Viscosidade cinem. Da água	0,000001	m ² /s

TENSÃO DE CISALHAMENTO NO LEITO (Tb)

Tb =	1,619	kg/m.s ²
------	-------	---------------------

DIÂMETRO DA PARTÍCULA ADIMENSIONAL

D* =	9,492
------	-------

TENSÃO SHIELDS

T* =	0,303
------	-------

Fonte: Próprio autor

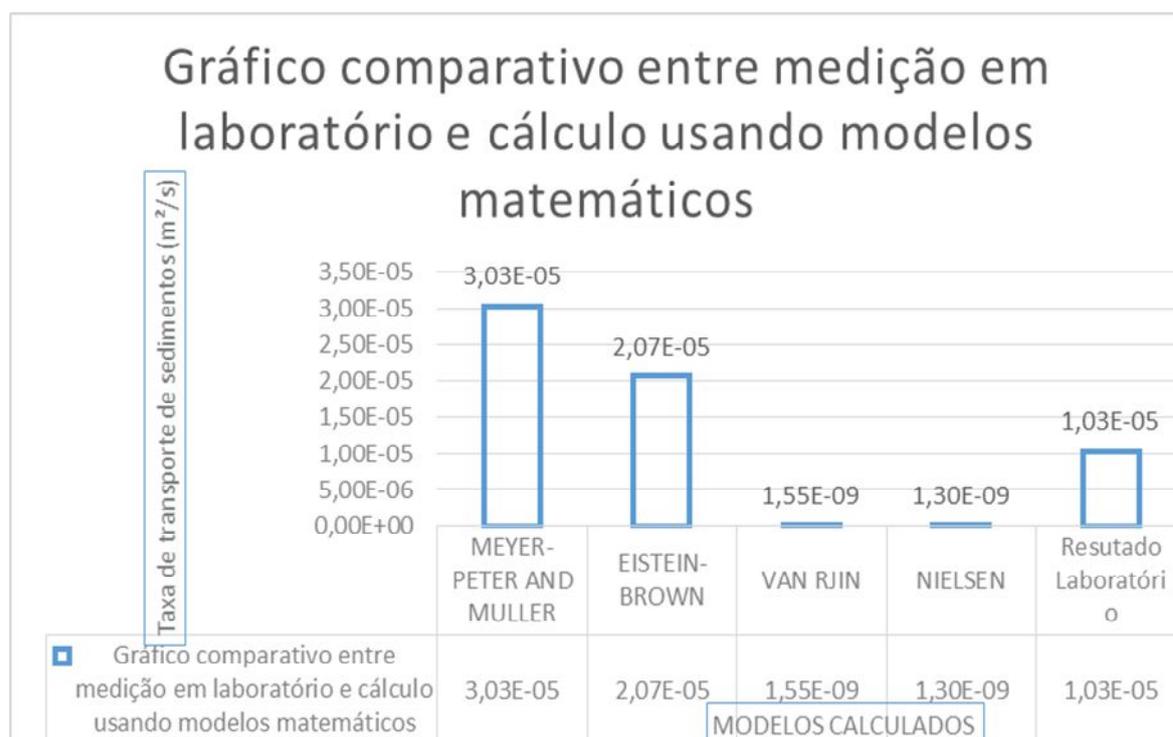
Quadro 16 - Resultados para ensaio 08

Resultado (qb)			
Modelo	Unidade	Valor	Varição %*
MEYER-PETER AND MULLER	m ² /s	3,03E-05	2,00E-05
EISTEIN-BROWN	m ² /s	2,07E-05	1,04E-05
YALIN	m ² /s	2,32E-03	2,31E-03
VAN RJIN	m ² /s	1,55E-09	-1,03E-05
NIELSEN	m ² /s	1,30E-09	-1,03E-05
RESULTADO LABORATÓRIO	m ² /s	1,03E-05	Referência

*Resultado em % da diferença entre o valor obtido em métodos matemáticos e o valor medido em laboratório

Fonte: Próprio autor

Figura 14 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos



Fonte: Próprio autor

4.1.9. ENSAIO 09 (Inclinação 1,5% e Tempo de 600 segundos)

Quadro 17 - Dados de entrada para cálculo de ensaio 09

VARIÁVEIS DE ENTRADA		
Massa específica do sedimento=	2339	Kg/m ³
Gravidade =	9,81	m/s ²
S ($\lambda_{\text{sedimento}}/\lambda_{\text{água}}$) =	2,339	
Diâmetro médio das partículas=	0,0004	m
Altura da lâmina da água =	0,0145	m
Massa específica da água =	1000	Kg/m ³
Declividade =	0,015	
Viscosidade cinem. Da água	0,000001	m ² /s

TENSÃO DE CISLHAMENTO NO LEITO (Tb)

$$T_b = 2,134 \text{ kg/m.s}^2$$

DIÂMETRO DA PARTÍCULA ADIMENSIONAL

$$D^* = 9,438$$

TENSÃO SHIELDS

$$T^* = 0,406$$

Fonte: Próprio autor

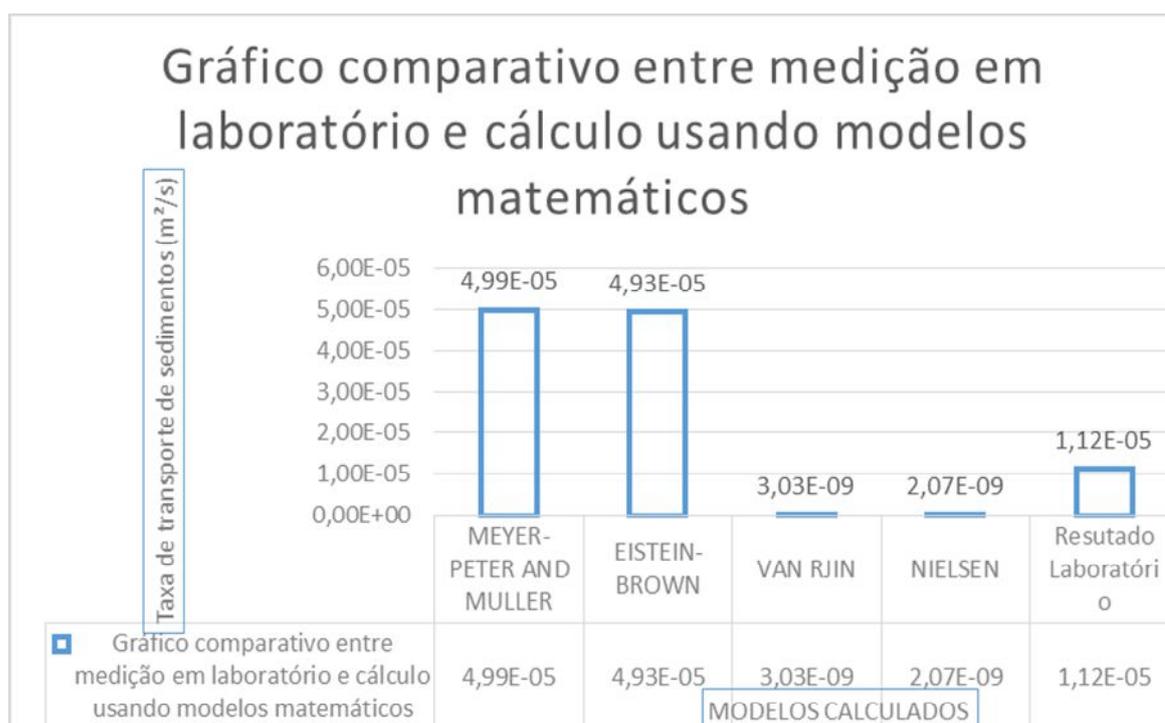
Quadro 18 - Resultados para ensaio 09

Resultado (qb)			
Modelo	Unidade	Valor	Variação %*
MEYER-PETER AND MULLER	m ² /s	4,99E-05	3,87E-05
EISTEIN-BROWN	m ² /s	4,93E-05	3,81E-05
YALIN	m ² /s	6,05E-03	6,04E-03
VAN RJJIN	m ² /s	3,03E-09	-1,12E-05
NIELSEN	m ² /s	2,07E-09	-1,12E-05
RESULTADO LABORATÓRIO	m ² /s	1,12E-05	Referência

*Resultado em % da diferença entre o valor obtido em métodos matemáticos e o valor medido em laboratório

Fonte: Próprio autor

Figura 15 - Gráfico de comparação de medição em laboratório e modelos matemáticos



Fonte: Próprio autor

De acordo com os resultados obtidos pode-se observar que os modelos de *Eisten-Brown* e *Meyer-Peter e Muller* possuem uma melhor representatividade do que está acontecendo na realidade, pois obtiveram uma resposta com menor diferença da obtida em laboratório. Esse resultado era esperado, porque estes modelos são usados para descarga de fundo e os sedimentos do canal feito em

laboratório se movimentavam por meio de rolamento, deslizamento e saltação no fundo do canal.

O modelo de Van Rijn e o modelo de Nielsen são usados quando o transporte de sedimentos é classificado como transporte em suspensão. Já o modelo de Yalin não teve uma boa resposta, apesar de ser um modelo de descarga de fundo, porque ele deve ser usado para sedimentos com diâmetros que variaram entre 0,787 mm a 2,86 mm e as partículas utilizadas no ensaio tinham 0,4mm, portanto esse diâmetro médio está fora do intervalo recomendado para aplicação deste modelo.

Para facilitar o comparativo foi representada a média dos resultados dos modelos que obtiveram melhores resultados, separando os dados de acordo com a inclinação e modelo matemático utilizado, então foi construído o seguinte gráfico.

Figura 16 – Comparativo dos melhores resultados de modelos matemáticos



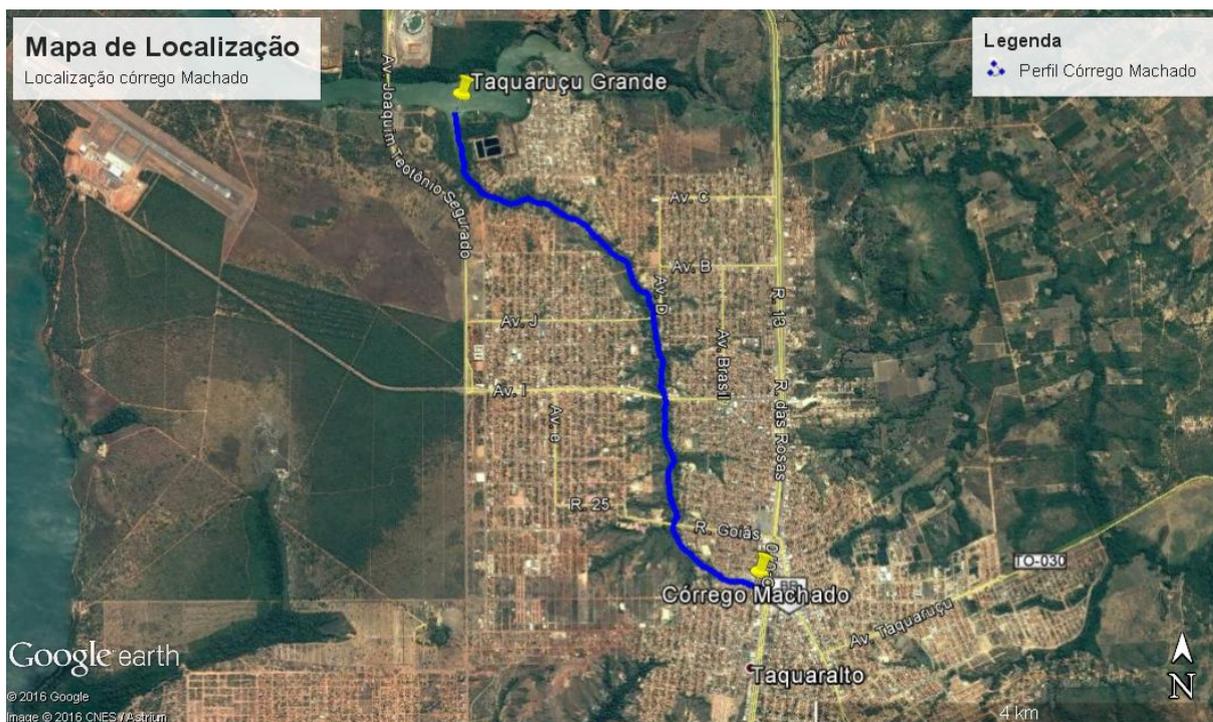
Fonte: Próprio autor

De modo geral os modelos ficam mais próximos do resultado do experimento de 60 segundos. Analisando as condições de execução do experimento pode se concluir que o caso de 60 segundos é o mais confiável, pois o experimento não foi realizado com recirculação do material do leito. Portanto a taxa de erosão para os tempos de 300 s e 600 s podem ter sido afetadas pela falta de material no leito.

4.2 SENSIBILIDADE DOS MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZANDO MÉTODO FOSM

A sensibilidade de cada modelo foi medida usando dados do Córrego Machado que foi escolhido por ficar localizado no perímetro urbano de Palmas-TO e por ter estudos detalhados sobre a sua bacia (Figura 17).

Figura 17 - Mapa de Localização do Córrego Machado



Fonte: Google earth

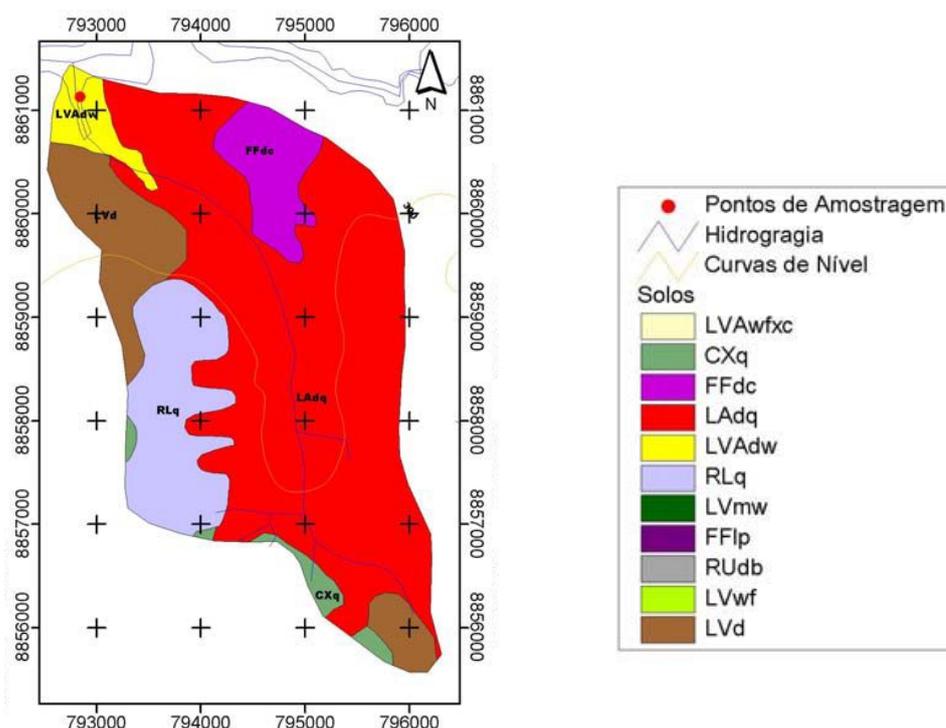
4.2.1 Caracterização da área do Córrego Machado

A microbacia do córrego Machado possui as seguintes classes de solos (Figura 7): Cambissolo Háplico, distrófico psamínico (CXdq); Plintossolo Pétrico Distrófico, concrecionário (FFdc); Neossolo Flúvido Distrófico, endoácrico, oxidíco (RUdb), Latossolo Amarelo Distrófico, psamítico (LAdq); Neossolo Litólico psamítico (RLq); Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, endoácrico (LVAdw), Latossolo Vermelho Distrófico, ácrico, oxidíco (LVd) (BONATO, 2008).

A maior parte da bacia é coberta pela classe de solo Latossolo Amarelo Distrófico, psamítico, e é caracterizada como sendo solos com baixa saturação de bases ($V < 50\%$), tendo como material de origem sedimentos aluvionares do quaternário, com relevo plano, declividade inferior a 3%, apresentando drenagem boa com deflúvio lento; quanto à erosão, classifica-se como laminar ligeira (BONATO, 2008).

A microbacia apresenta altitudes entre 220 e 260 metros e seu relevo é plano com taxa de declividade de 0° a 15° é a área de estudo mais homogênea sendo composta pelo ambiente geológico da Formação Pimenteiras (Dp) e sua geomorfologia é representada pela Depressão Palmas-Lajeado.

Figura 18 - Caracterização do solo na área de estudo



Fonte: Bonato, 2008

4.2.2 Fatores que afetam a produção de sedimentos

A produção de sedimento derivada da área de drenagem, ou correspondente a toda uma bacia hidrográfica, é dependente da erosão, do escoamento das águas de chuva com o carreamento dos sedimentos e das características de transporte de sedimento nos cursos d'água.

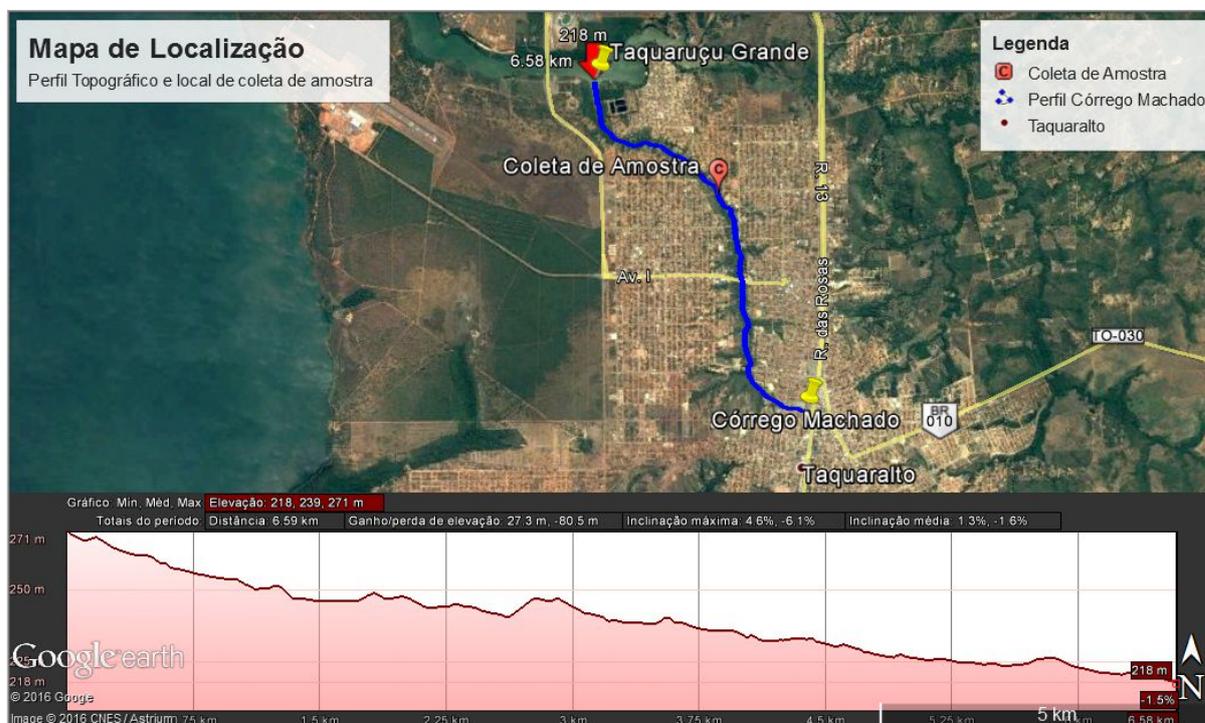
Porém as deduções dos modelos matemáticos calculam apenas o volume de sedimentos considerando somente as características do transporte de sedimentos no curso d'água.

4.2.3 Variáveis de entrada nos modelos

A declividade do córrego Machado foi mensurada por meio de imagem de satélite do Google Earth, onde o próprio software dá o parâmetro de declividade média, que foi de 1,3%, como pode ser observado na Figura abaixo, já a variância

foi feita obtendo-se do software as declividades a cada 750m, obtendo o valor de 0,81%.

Figura 19 - Declividade Média do Córrego Machado



Fonte: Google Earth, 2017

O parâmetro de altura da lâmina de água teve como fonte o trabalho de Bonato (2008), onde ele mediu essa profundidade ao longo do ano e então foi feita uma média para obter um valor único (tabela abaixo).

Os parâmetros de granulometria e densidade do sedimento foram obtidos por meio de ensaios laboratoriais, portanto foram coletadas amostras como mostrado na Figura 19, cujas coordenadas são mostradas na tabela 6 com DATUM SIRGAS 2000 e pode ser observado na figura 20, em cada ponto foi coletado uma amostra de aproximadamente 20kg para realização dos ensaios (figura 20).

Tabela 5 – Tabela com parâmetro de Profundidade média do Córrego Machado

Mês	Parâmetros			
	Profundidade média (m)	Largura (m)	Velocidade média (m/s)	Vazão (m ³ /s)
jan/07	0,33	3,45	0,303	0,277
fev/07	0,36	4,70	0,323	0,448
mar/07	0,45	5,20	0,260	0,416
abr/07	0,46	3,70	0,263	0,335
mai/07	0,26	3,00	0,180	0,156
jun/07	0,27	3,00	0,153	0,140
jul/07	0,26	3,10	0,070	0,049
ago/07	0,21	3,40	0,067	0,033
set/07	0,16	3,40	0,077	0,033
out/07	0,21	3,80	0,133	0,083
nov/07	0,30	1,80	0,143	0,075
dez/07	0,28	2,00	0,173	0,073
jan/08	0,35	2,20	0,217	0,014
Média	0,30	3,29	0,18	0,16
Variância	0,00734	0,87621	0,00693	0,02151

Fonte: Bonato, 2008

Figura 20 - Coleta de amostra em Córrego Machado



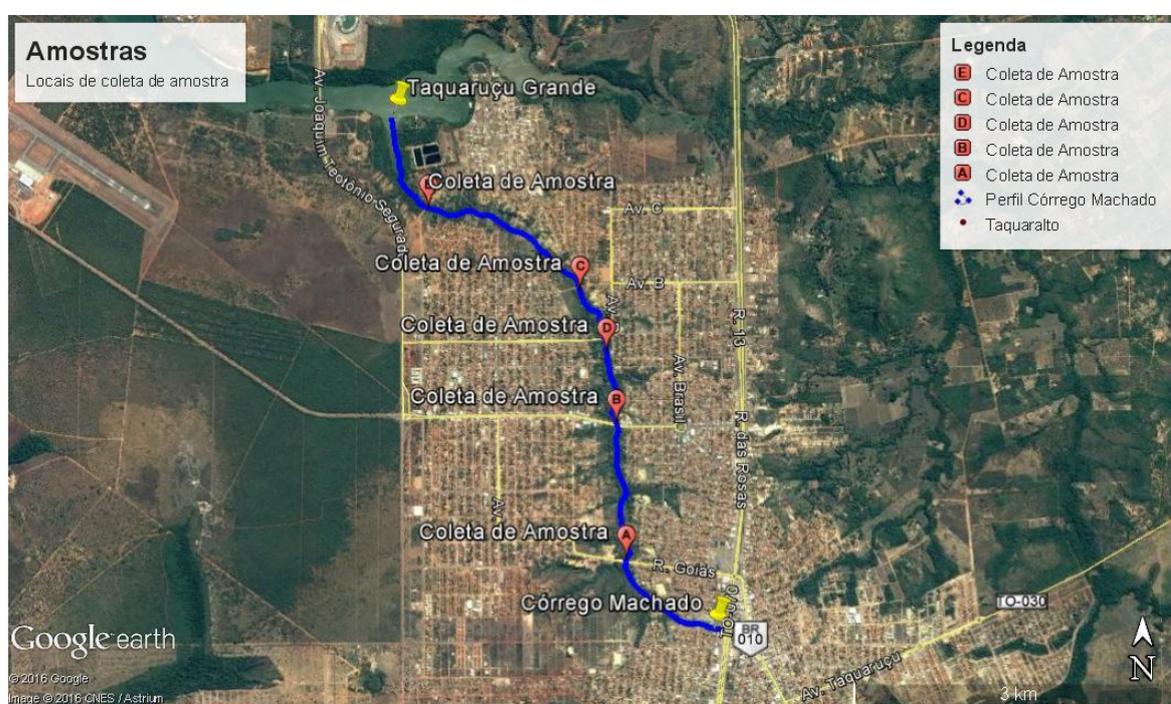
Fonte: Próprio autor

Tabela 6 – Coordenadas dos pontos de coleta de amostra

Corpo de Prova	Coordenadas	
	Latitude	Longitude
A	10°19'37.11"S	48°18'25.16"O
B	10°18'56.79"S	48°18'28.13"O
C	10°18'16.77"S	48°18'39.16"O
D	10°18'35.36"S	48°18'31.17"O
E	10°17'52.06"S	48°19'25.51"O

Fonte: Próprio autor

Figura 21 - Locais de coleta de amostra



Fonte: Google earth

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a norma NBR 7181:1984, o ensaio foi realizado no Laboratório do CEULLP/ULBRA pelo próprio autor da pesquisa, obtendo-se os gráficos em anexo e então com os valores médios de diâmetro de cada ensaio pode-se obter a média geral e a variância tabela, que serão usados no cálculo do método FOSM.

Tabela 7 – Valores médios e variância de diâmetros médios

Amostra	Diâmetro médio (m)
A	0,00318
B	0,00647
C	0,00245
D	0,00488
E	0,00320
Média	0,0040
Variância	0,0000021

Fonte: Próprio autor

A densidade do sedimento foi realizada de acordo com a Norma NBR NM 53:2009, o ensaio foi realizado no Laboratório do CEULP/ULBRA pelo próprio autor da pesquisa e foram usadas as mesmas amostras da granulometria para então obter a média e a variância, como pode ser observado na tabela abaixo.

Tabela 8 – Tabela de massa específica

Amostra	Massa específica g/cm ³	Massa específica kg/m ³
A	2,56	2564,10
B	2,74	2739,73
C	2,56	2564,10
D	2,60	2597,40
E	2,50	2500,00
Média	2,59	2593,07
Variância	0,0064	6373,40

Fonte: Próprio autor

4.2.4 Cálculo de sensibilidade usando método FOSM

Utilizando os valores de média e variância citados no item 4.2.3, pode-se calcular a tabela do método FOSM, que vai mensurar a sensibilidade que a taxa de sedimento terá quando se varia cada parâmetro individualmente.

Tabela 9 – Método FOSM para modelo Meyer – Peter e Muller

Parâmetros	X_i	δX_i	$\delta[q]_{ii}$	$\frac{\delta[q]_{ii}}{\delta X_i}$	$V[X_i]$	$\left(\frac{\delta q_i}{\delta X_i}\right)^2$	$V[X]_i$
Diam. Partícula	0,004	0,002	-2,00E-04	-0,116	2,00E-06	2,80E-08	0,00%
Dens. do sedimento	2593,1	1296,5	-0,021	-2,00E-05	6373,4	1,63E-06	0,13%
Profundidade	0,3	0,15	0,0029	0,0195	0,0073	2,79E-06	0,23%
Declividade	0,015	0,0075	0,0029	0,3903	0,0081	1,23E-03	99,64%
Total =					$V[q]$	1,23E-03	100%

Fonte: Próprio autor

De acordo com análise feita pelo método FOSM para o modelo matemático de Meyer – Peter e Muller a variável com maior sensibilidade de resultado da taxa de sedimento é a declividade, os outros parâmetros quando variados possuem uma resposta com pequena variação.

Tabela 10 – Método FOSM para Modelo Eisten - Brown

Parâmetros	X_i	δX_i	$\delta[q]_{ii}$	$\frac{\delta[q]_{ii}}{\delta X_i}$	$V[X_i]$	$\left(\frac{\delta q}{\delta X}\right)^2_x$	$V[X]_i$
Diam. Partícula	0,004	0,002	-0,02	-10,22	2,00E-06	2,20E-04	1,32%
Dens. do sedimento	2593,1	1296,5	-0,745	-6,00E-04	6373,4	2,11E-03	12,63%
Profundidade	0,3	0,15	0,01	0,0666	0,0073	3,26E-05	0,20%
Declividade	0,015	0,0075	0,01	1,3322	0,0081	1,43E-02	86%
Total =					$V[q]$	1,67E-02	100%

Fonte: Próprio autor

De acordo com análise feita pelo método FOSM para o modelo matemático de Eisten - Brown a variável com maior sensibilidade de resultado da taxa de sedimento é a declividade, porém quando se a densidade muda o modelo tem uma variação considerável na resposta, já o diâmetro médio e a profundidade quando variados possuem uma resposta com pequena variação.

Tabela 11 - Método FOSM para Modelo Yalin

Parâmetros	X_i	δX_i	$\delta[q]_{ii}$	$\frac{\delta[q]_{ii}}{\delta X_i}$	$V[X_i]$	$\left(\frac{\delta q}{\delta X}\right)^2_x$	$V[X]_i$
Diam. Partícula	0,004	0,002	1,8483	924,14	2,00E-06	1,79349	6,33%
Dens. do sedimento	2593,1	1296,5	33,572	0,0259	6373,4	4,27316	15,07%
Profundidade	0,3	0,15	-0,394	-2,625	0,0073	0,050558	0,18%
Declividade	0,015	0,0075	-0,394	-52,5	0,0081	2,22E+01	78%
Total =					$V[q]$	2,83E01	100%

Fonte: Próprio autor

De acordo com análise feita pelo método FOSM para o modelo matemático de Yalin a variável com maior sensibilidade de resultado da taxa de sedimento é a declividade, porém quando a densidade ou o diâmetro médio muda o modelo tem uma variação considerável na resposta, já a profundidade quando variada possui uma resposta com pequena variação.

Tabela 12 - Método FOSM para Modelo Van Rjin

Parâmetros	X_i	δX_i	$\delta[q]_{ii}$	$\frac{\delta[q]_{ii}}{\delta X_i}$	$V[X_i]$	$\left(\frac{\delta q}{\delta X}\right)^2_x$	$V[X]_i$
Diam. Partícula	0,004	0,002	-4,00E-07	-2,00E-04	2,00E-06	9,34E-14	0,02%
Dens. do sedimento	2593,1	1296,5	-7,00E-05	-5,00E-08	6373,4	1,64E-11	3,12%
Profundidade	0,3	0,15	2,00E-06	1,00E-05	0,0073	1,16E-12	0,22%
Declividade	0,015	0,0075	2,00E-06	0,0003	0,0081	5,09E-10	97%
Total =					$V[q]$	5,27E-10	100%

Fonte: Próprio autor

De acordo com análise feita pelo método FOSM para o modelo matemático de Van Rjin a variável com maior sensibilidade de resultado da taxa de sedimento é a declividade, porém quando a densidade muda o modelo tem uma pequena variação na resposta, já os outros parâmetros quando variados possuem uma resposta com pequena variação.

Tabela 13 - Método FOSM para Modelo Nielsen

Parâmetros	X_i	δX_i	$\delta[q]_{ii}$	$\frac{\delta[q]_{ii}}{\delta X_i}$	$V[X_i]$	$\left(\frac{\delta q}{\delta X}\right)^2_x$	$V[X]_i$
Diam. Partícula	0,004	0,002	3,00E-06	0,0017	2,00E-06	5,73E-12	0,32%
Dens. do sedimento	2593,1	1296,5	-2,00E-05	-2,00E-08	6373,4	2,32E-12	0,13%
Profundidade	0,3	0,15	4,00E-06	2,00E-05	0,0073	4,07E-12	0,23%
Declividade	0,015	0,0075	4,00E-06	0,0005	0,0081	1,79E-09	99%
Total =					$V[q]$	1,80E-09	100%

Fonte: Próprio autor

De acordo com análise feita pelo método FOSM para o modelo matemático de Nielsen a variável com maior sensibilidade de resultado da taxa de sedimento é a declividade, os outros parâmetros quando variados possuem uma resposta com pequena variação.

5. CONCLUSÃO

O estudo do transporte de sedimentos possui grande importância, pois assim pode ser mensurado a quantidade de sedimentos carregada pelo rio, riacho, córrego e etc. E ainda quando este transporte de sedimentos é mensurado por meio de modelos matemáticos, temos a vantagem de obter um resultado com boa confiança, baixo custo e com maior facilidade na coleta de dados.

Os modelos matemáticos mais usados até hoje são: Modelo de Meyer-Peter e Muller, Modelo de Eisten-Brown, Modelo de Yalin, Modelo de Van Rijn e Modelo de Nielsen, cada um deles deve ser usado com cautela, pois possuem limitações quanto ao tipo de transporte, diâmetro da partícula, desvio padrão do diâmetro da partícula e ainda deve ser analisado a sensibilidade de um dado parâmetro de interesse para obter um resultado mais próximo ao real.

De acordo com os resultados obtidos nas comparações entre modelos matemáticos e ensaio de laboratório os modelos que obtiveram resultados mais próximos do laboratório foram de Meyer-Peter e Muller e Eisten-Brown, pois estes modelos são usados para descarga de fundo (o ensaio de laboratório tinha o transporte de sedimentos por descarga de fundo), os resultados obtidos mostram que estes modelos não possuem bons resultados para declividades muito baixas.

Segundo o método FOSM e considerando as características do Córrego Machado, que foi usado para obter os parâmetros de entrada, foi observado que todos os modelos matemáticos possuem uma grande sensibilidade na taxa de transporte de sedimentos quando se varia a declividade, porém os modelos Eisten-Brown e Yalin também possuem uma variação considerável quando se muda o valor de massa específica, já as respostas para diâmetro da partícula e profundidade em todos os modelos foram pequenas.

Sugiro para um trabalho futuro a realização de um modelo matemático usando os dados coletados e ainda fazer análise pelo método FOSM usando dados de outro corpo hídrico para comparar os resultados e verificar se a sensibilidade dos parâmetros continua com as mesmas percentagens.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APSLEY, D. David; STANSBY, Peter K. **Bed-Load sediment transport on large slopes: model formulation and implementation within a RANS solver.** Journal of Hydraulic Engineering. October, 2008.

ASSIS, André P. **Métodos estatísticos e probabilísticos em geotecnia.** Universidade de Brasília. Brasília-DF, 2002.

BONATO, Gustavo. **Uso da terra e produção de sedimentos na sub-bacia do ribeirão taquaruçu grande, contribuinte ao reservatório da usina hidrelétrica do lajeado, Tocantins.** 2008. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro.

BRUNE, G. M.; ALLEN, R. E. **A consideration of factor influencing reservoir sedimentation.** In: The Ohio Valley region. American Geophysical Union. Vol. 2. 1941.

BARCELOS, A.A. **Geração de sulcos em meio coesivo e caracterização hidrossedimentométrica de sua evolução.** 2005, 217p. Universidade federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio grande do Sul, 2005. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/7652>> Acesso em: 31/08/2016.

CHANG, Howard H. **Fluvial Processes in River Engineering.** Malabar (FL): Krieger Publishing Company, 432p. 1998.

CARDOSO, António Heleno. **Hidráulica fluvial.** Lisboa: Fundação Caloute Gulbenkian. 314p, 1998.

CARVALHO, José Camapum; SALES, Mauricio Martines; SOUZA, Newton Moreira; MELO, Maria Tereza da Silva. **Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro.** Brasília: Finatec. 2006.

CARVALHO, Newton de Oliveira, **Hidrossedimentologia Prática.** Eletrobrás, CPRM, Rio de Janeiro, 1994.

CARVALHO, N.O. **Assoreamento de reservatórios – consequências e mitigação dos efeitos.** In: IV Encontro Nacional de engenharia de Sedimentos. Santa Maria-RS. Cdrom. 1-22p. 2000.

DOLVITSH, Juliane Natália. **Simulação do transporte de sedimentos em rios e canais: estudo sobre softwares disponíveis.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil. Porto Alegre – RS. 2013. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/78217/000896798.pdf?sequence=1>. Acesso em: 24 de agosto de 2016.

_____. Foto Diagrama de Shields. Disponível em:
<<http://washingtonchampionsleague.com/wp-includes/pomo/hjulstrom-curve-explained>>. Acesso em 05/10/2016.

GLYMPH, L. M. **Sedimentation of Reservoirs**. In: Ackermann, W. C. et al. Man – made lakes: Their problems and environmental. Washington DC. American Geophysical Union p. 342-348. 1973

LIMA, Jorge E. F. W.; SILVA, E. M.; EID, N. J.; MARTINS, E. S.; KOIDE, S.; REATTO, A. **Desenvolvimento e verificação de métodos indiretos para a estimativa da erodibilidade dos solos da bacia experimental do Alto rio jardim-DF**. Revista Brasileira de geomorfologia, nº02, 2007.

MACEDO, Wanderson da Silva. **Avaliação experimental de transporte de sedimento em materiais granulares**. Trabalho de Conclusão de Curso, CEULP/ULBRA. Palmas-TO, 2016.

MAGALHÃES, Ricardo Aguiar. **Erosão: definições, tipos e formas de controle**. VII Simpósio nacional de controle de erosão, Goiânia-GO, 2001.

MARCELINO, Luciana. **Transporte de sedimentos em suspensão nos rios catarinenses**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2009.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. Blackwell Publishing, Inglaterra, 3.ed. 304p. 2005.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água: Associação Brasileira de Normas Técnicas. Mercosul, 2009.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1984.

PORTUGUÊS, C. L. P. C. **Programação de modelos de transporte sedimentar comparação de soluções**. 88 f. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Departamento de Engenharia civil. Universidade de Aveiro, Aveiro-Portugal. 2008. Disponível em: <http://ria.ua.pt/bitstream/10773/2340/1/2008001829.pdf> . Acesso em 25/08/2016.

_____. <http://www.prodetc.com.br/downloads/pesos_especificos.pdf>. Acesso em 31 de agosto de 2016.

PRESS, Frank; SIEVER, Raymond; GROTZINGER, John; JORDAN, Thomas H. **Para entender a terra**. Bookman, 4ª edição. 2006.

RAUDKIVI, A. J. **Loose boundary hydraulics**. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 1990.

SANTOS et al, **Hidrometria aplicada**. 1ª ed. Curitiba: Instituto de tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. 372p.

SCAPIN, Juliana; PAIVA, João Batista Dias; BELING, Fábio A. **Avaliação de método de cálculo do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano**. Departamento de hidráulica e saneamento – UFSM – Santa Maria, RS. 2007.

SIMÕES, S. J. C.; COIADO; E. M. **Processos erosivos: Hidrologia aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre. ABRH, 2001. Cap. 10, p. 283-293.

SOUSA, J. M. **Desafios da medição experimental da descarga de fundo no estuário do timbó construção e testes de um amostrador**. 2011. 154f (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós graduação em Engenharia mecânica, Universidade federal de Pernambuco, Recife, 2011.

_____. UNITED KINGDOM GEOLOGICAL SOCIETY, 2012.

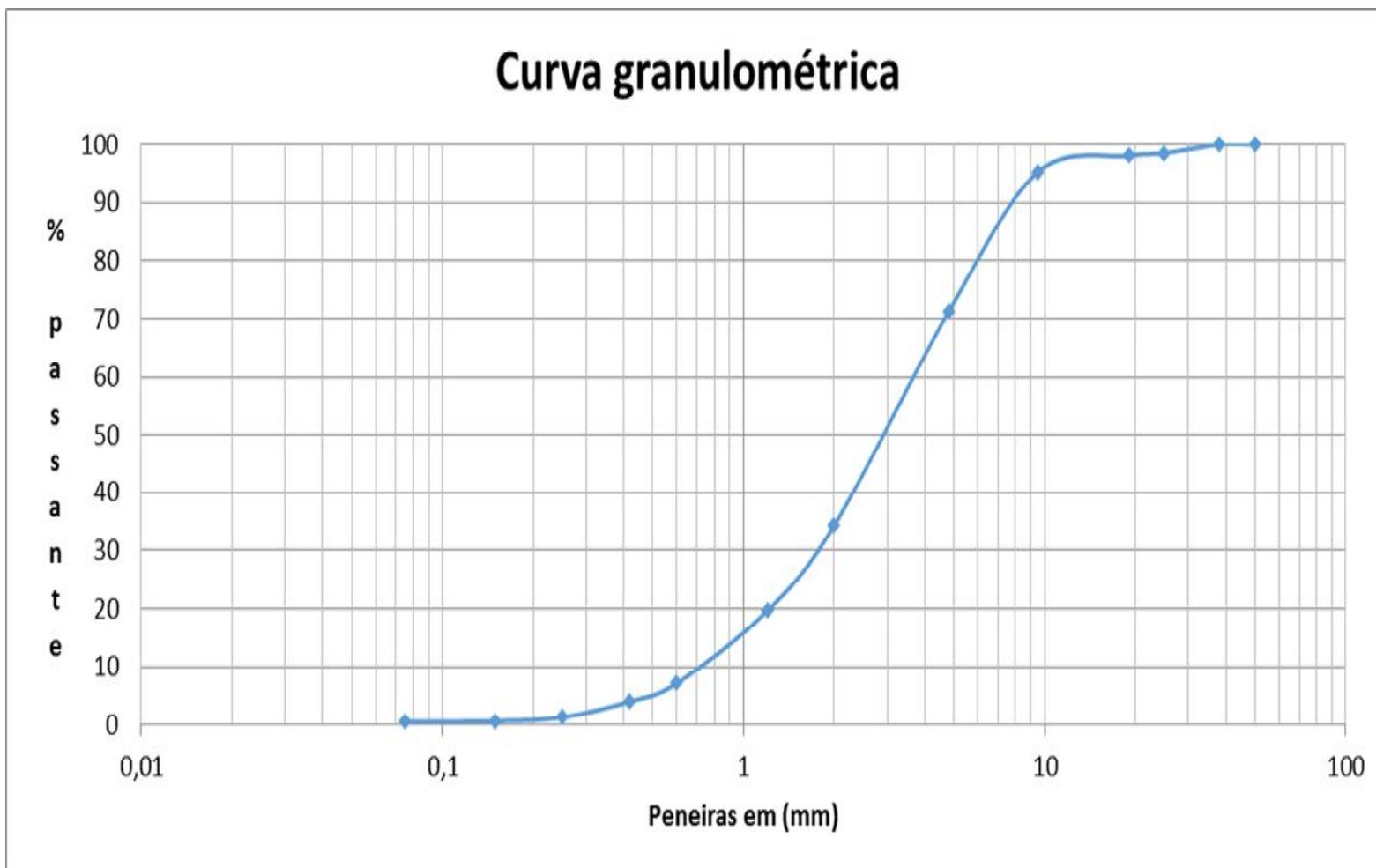
VANONI, V.A. **Sedimentation Engineering**. ASCE, American Society of civil Engineers. New York, NY. P. 743. 1977.

VAN RJJIN, L.C. Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, Vol. 110, n. 10, Out. 1984.

APÊNDICES

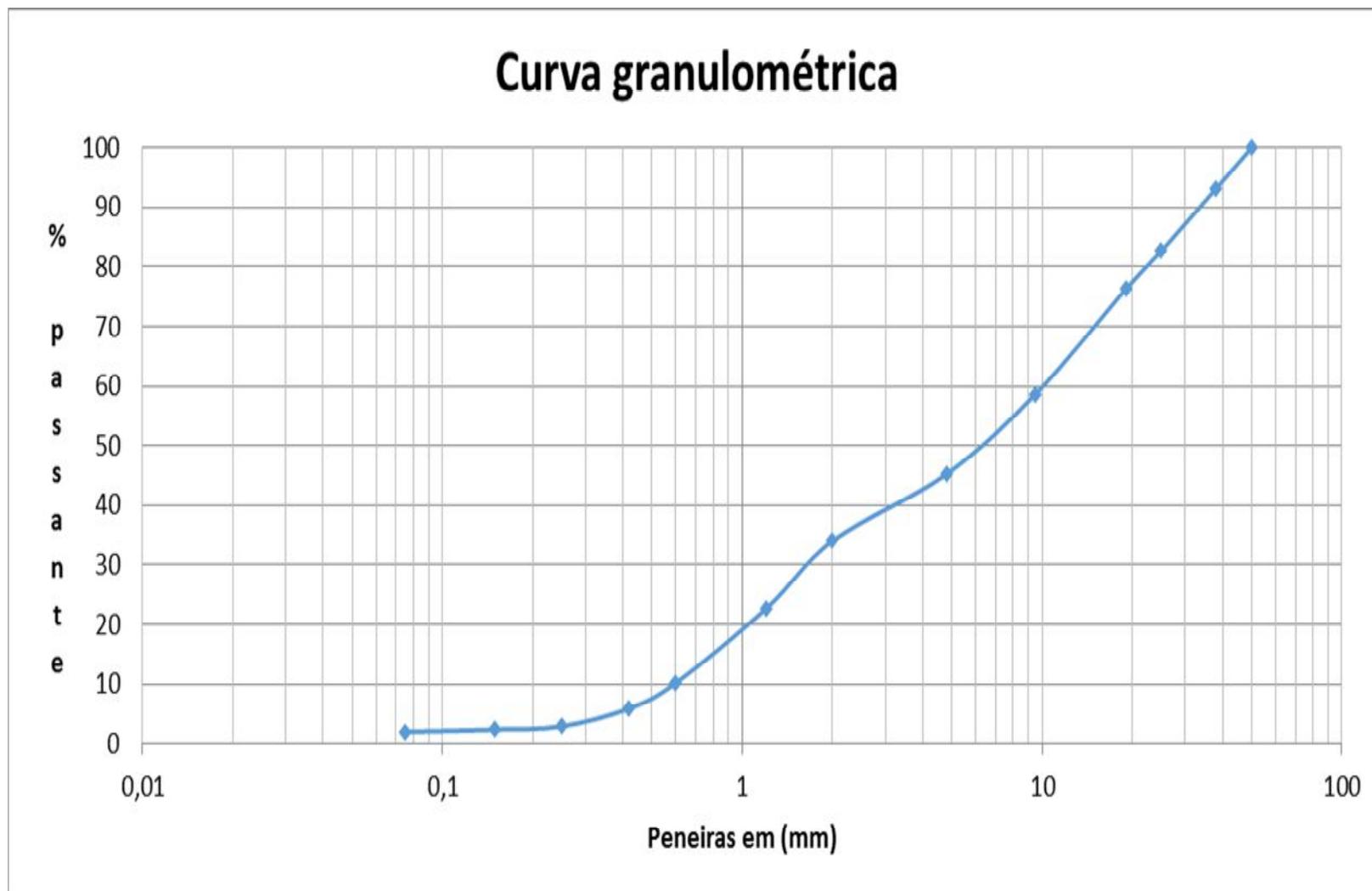
APÊNDICE A – Quadro com análise granulométrica da Amostra A

Umidade Higroscópica			PENEIRAMENTO DO MATERIAL GROSSO						
			Peneiras		Massa da amostra seca (g)				
N° cápsula	6	14	Pol.	mm	Retido	Passado	% passante do material seco		
C + S + A	67,0	68,4	2	50	0,00	1997,26	100,0		
C + S	66,8	68,2	1 1/2"	38	0,00	1997,26	100,0		
Água (g)	0,2	0,2	1"	25	29,20	1968,06	98,5		
Massa da Cáps. (g)	17,1	17,2	3/4"	19	9,30	1958,76	98,1		
Solo seco (g)	49,7	51,00	3/8"	9,5	55,10	1903,66	95,3		
Umidade (%)	0,4	0,4	N° 4	4,8	479,60	1424,06	71,3		
Umidade média	0,4		N° 10	2,0	737,90	686,16	34,4		
AMOSTRA			PENEIRAMENTO MATERIAL FINO						
Amostra total úmida (g)	2000		Massa da amostra parcial úmida =				100	g	
Solo seco retido pen. N° 10 (g)	1311,1		Massa da amostra parcial seca =				99,6	g	
Solo úmido passante pen. N° 10 (g)	688,9		PENEIRAS		Massa da amostra seca (g)		% que passa da amostra parcial	% que passa da amostra total	
Solo seco passante pen. N° 10 (g)	686,16		POL.	mm	RETIDO	PASSADO			
Amostra total seca (g)	1997,26								
RESUMO GRANULOMÉTRICO									
PEDREGULHO	65,6 %		16	1,2	42,60	57,00	57,2	19,7	
AREIA DE GRADUAÇÃO GROSSA	27,2 %		30	0,6	36,20	20,80	20,9	7,2	
AREIA DE GRADUAÇÃO MÉDIA	5,9 %		40	0,42	9,10	11,70	11,7	4,0	
AREIA DE GRADUAÇÃO FINA	0,8 %		60	0,25	7,90	3,80	3,8	1,3	
SILTE + ARGILA	0,6 %		100	0,15	1,80	2,00	2,0	0,7	
	100,0 %		200	0,075	0,40	1,60	1,6	0,6	



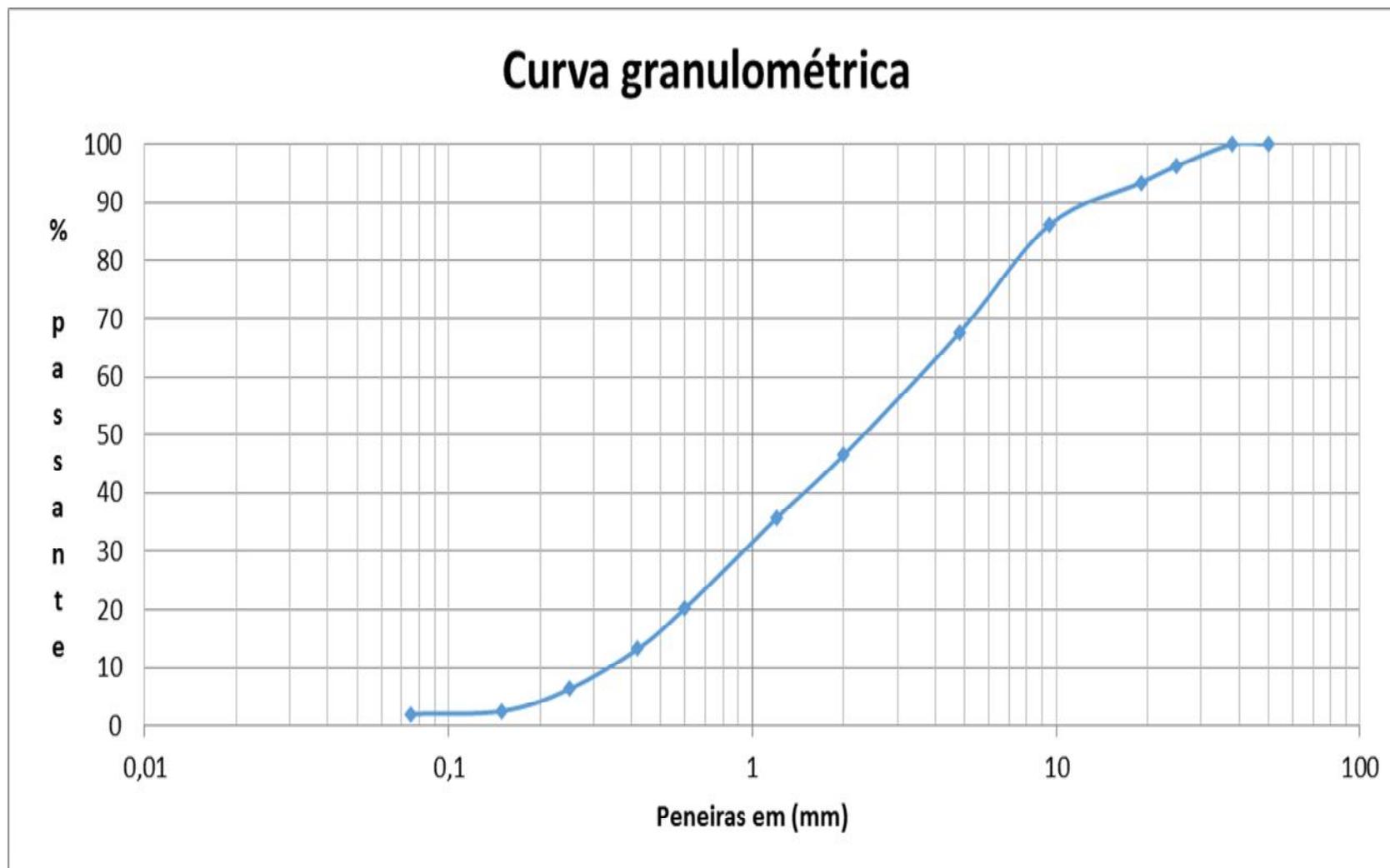
APÊNDICE B – Quadro com análise granulométrica da Amostra B

Umidade Higroscópica			PENEIRAMENTO DO MATERIAL GROSSO						
			Peneiras		Massa da amostra seca (g)				
N° cápsula	13	54	Pol.	mm	Retido	Passado	% passante do material seco		
C + S + A	69,4	68,3	2	50	0,00	1995,93	100,0		
C + S	69	68	1 1/2"	38	137,10	1858,83	93,1		
Água (g)	0,4	0,3	1"	25	207,40	1651,43	82,7		
Massa da Cáps. (g)	11,7	17,9	3/4"	19	129,10	1522,33	76,3		
Solo seco (g)	57,3	50,10	3/8"	9,5	351,70	1170,63	58,7		
Umidade (%)	0,7	0,6	N° 4	4,8	267,70	902,93	45,2		
Umidade média	0,6		N° 10	2,0	224,00	678,93	34,0		
AMOSTRA			PENEIRAMENTO MATERIAL FINO						
Amostra total úmida (g)	2000		Massa da amostra parcial úmida =			100	g		
Solo seco retido pen. N° 10 (g)	1317		Massa da amostra parcial seca =			99,4	g		
Solo úmido passante pen. N° 10 (g)	683		PENEIRAS		Massa da amostra seca (g)		% que passa da amostra parcial	% que passa da amostra total	
Solo seco passante pen. N° 10 (g)	678,93		POL.	mm	RETIDO	PASSADO			
Amostra total seca (g)	1995,93								
RESUMO GRANULOMÉTRICO									
PEDREGULHO	66,0 %		16	1,2	33,20	66,20	66,6	22,7	
AREIA DE GRADUAÇÃO GROSSA	23,8 %		30	0,6	36,40	29,80	30,0	10,2	
AREIA DE GRADUAÇÃO MÉDIA	7,3 %		40	0,42	12,50	17,30	17,4	5,9	
AREIA DE GRADUAÇÃO FINA	0,9 %		60	0,25	8,80	8,50	8,6	2,9	
SILTE + ARGILA	2,0 %		100	0,15	1,60	6,90	6,9	2,4	
	100,0 %		200	0,075	1,10	5,80	5,8	2,0	



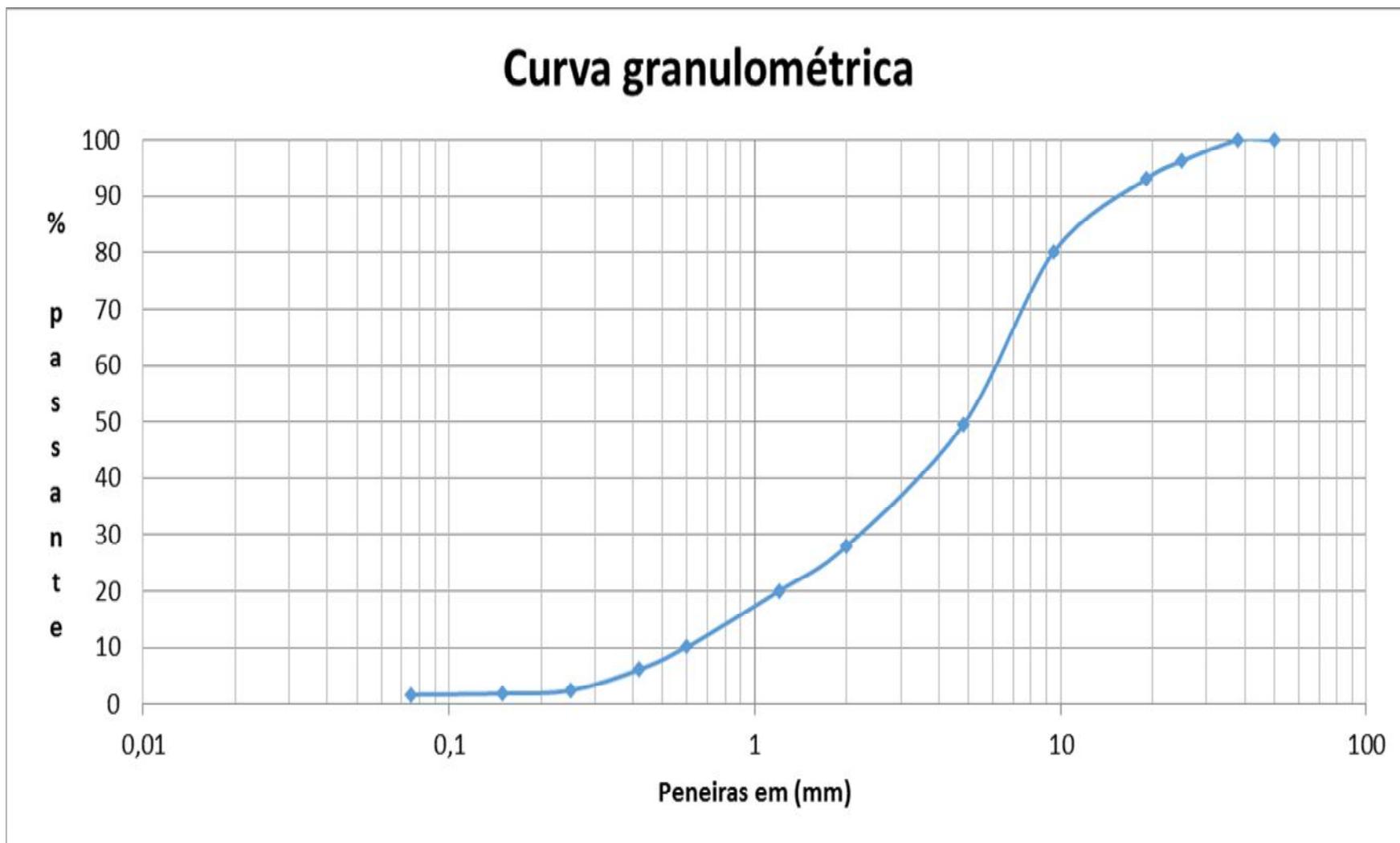
APÊNDICE C – Quadro com análise granulométrica da Amostra C

Umidade Higroscópica			PENEIRAMENTO DO MATERIAL GROSSO					% passante do material seco	
			Peneiras		Massa da amostra seca (g)				
Nº cápsula	2	7	Pol.	mm	Retido	Passado			
C + S + A	64,4	69	2	50	0,00	1979,72	100,0		
C + S	63,4	67,9	1 1/2"	38	0,00	1979,72	100,0		
Água (g)	1	1,1	1"	25	71,90	1907,82	96,4		
Massa da Cáps. (g)	18	17,8	3/4"	19	57,30	1850,52	93,5		
Solo seco (g)	45,4	50,10	3/8"	9,5	143,80	1706,72	86,2		
Umidade (%)	2,2	2,2	Nº 4	4,8	368,20	1338,52	67,6		
Umidade média	2,2		Nº 10	2,0	416,80	921,72	46,6		
AMOSTRA			PENEIRAMENTO MATERIAL FINO						
Amostra total úmida (g)	2000		Massa da amostra parcial úmida =				100	g	
Solo seco retido pen. Nº 10 (g)	1058		Massa da amostra parcial seca =				97,8	g	
Solo úmido passante pen. Nº 10 (g)	942		PENEIRAS		Massa da amostra seca (g)		% que passa da amostra parcial	% que passa da amostra total	
Solo seco passante pen. Nº 10 (g)	921,72		POL.	mm	RETIDO	PASSADO			
Amostra total seca (g)	1979,72								
RESUMO GRANULOMÉTRICO									
PEDREGULHO	53,4 %		16	1,2	22,90	74,90	76,6	35,7	
AREIA DE GRADUAÇÃO GROSSA	26,3 %		30	0,6	32,30	42,60	43,6	20,3	
AREIA DE GRADUAÇÃO MÉDIA	13,9 %		40	0,42	14,70	27,90	28,5	13,3	
AREIA DE GRADUAÇÃO FINA	4,3 %		60	0,25	14,60	13,30	13,6	6,3	
SILTE + ARGILA	2,0 %		100	0,15	8,00	5,30	5,4	2,5	
	100,0 %		200	0,075	1,00	4,30	4,4	2,0	



APÊNDICE D – Quadro com análise granulométrica da Amostra D

Umidade Higroscópica			PENEIRAMENTO DO MATERIAL GROSSO						
			Peneiras		Massa da amostra seca (g)				
N° cápsula	11	53	Pol.	mm	Retido	Passado	% passante do material seco		
C + S + A	66,6	74	2	50	0,00	1987,72	100,0		
C + S	65,5	72,7	1 1/2"	38	0,00	1987,72	100,0		
Água (g)	1,1	1,3	1"	25	73,80	1913,92	96,3		
Massa da Cáps. (g)	17,8	12	3/4"	19	64,00	1849,92	93,1		
Solo seco (g)	47,7	60,70	3/8"	9,5	256,80	1593,12	80,1		
Umidade (%)	2,3	2,1	N° 4	4,8	609,50	983,62	49,5		
Umidade média	2,2		N° 10	2,0	425,50	558,12	28,1		
AMOSTRA			PENEIRAMENTO MATERIAL FINO						
Amostra total úmida (g)	2000		Massa da amostra parcial úmida =				100	g	
Solo seco retido pen. N° 10 (g)	1429,6		Massa da amostra parcial seca =				97,8	g	
Solo úmido passante pen. N° 10 (g)	570,4		PENEIRAS		Massa da amostra seca (g)		% que passa da amostra parcial	% que passa da amostra total	
Solo seco passante pen. N° 10 (g)	558,12		POL.	mm	RETIDO	PASSADO			
Amostra total seca (g)	1987,72								
RESUMO GRANULOMÉTRICO									
PEDREGULHO	71,9 %		16	1,2	28,00	69,80	71,4	20,0	
AREIA DE GRADUAÇÃO GROSSA	18,0 %		30	0,6	34,60	35,20	36,0	10,1	
AREIA DE GRADUAÇÃO MÉDIA	7,6 %		40	0,42	13,80	21,40	21,9	6,1	
AREIA DE GRADUAÇÃO FINA	0,7 %		60	0,25	12,80	8,60	8,8	2,5	
SILTE + ARGILA	1,7 %		100	0,15	1,90	6,70	6,9	1,9	
	100,0 %		200	0,075	0,70	6,00	6,1	1,7	



APÊNDICE E – Quadro com análise granulométrica da Amostra E

Umidade Higroscópica			PENEIRAMENTO DO MATERIAL GROSSO						
			Peneiras		Massa da amostra seca (g)				
N° cápsula	2	8	Pol.	mm	Retido	Passado	% passante do material seco		
C + S + A	59,1	73,8	2	50	0,00	1984,66	100,0		
C + S	58,3	72,7	1 1/2"	38	0,00	1984,66	100,0		
Água (g)	0,8	1,1	1"	25	22,30	1962,36	98,9		
Massa da Cáps. (g)	11,9	17	3/4"	19	37,30	1925,06	97,0		
Solo seco (g)	46,4	55,70	3/8"	9,5	187,00	1738,06	87,6		
Umidade (%)	1,7	2,0	N° 4	4,8	546,90	1191,16	60,0		
Umidade média	1,8		N° 10	2,0	338,90	852,26	42,9		
AMOSTRA			PENEIRAMENTO MATERIAL FINO						
Amostra total úmida (g)	2000		Massa da amostra parcial úmida =				100	g	
Solo seco retido pen. N° 10 (g)	1132,4		Massa da amostra parcial seca =				98,2	g	
Solo úmido passante pen. N° 10 (g)	867,6		PENEIRAS		Massa da amostra seca (g)		% que passa da amostra parcial	% que passa da amostra total	
Solo seco passante pen. N° 10 (g)	852,26		POL.	mm	RETIDO	PASSADO			
Amostra total seca (g)	1984,66								
RESUMO GRANULOMÉTRICO									
PEDREGULHO	57,1 %		16	1,2	14,10	84,10	85,6	36,8	
AREIA DE GRADUAÇÃO GROSSA	12,1 %		30	0,6	13,50	70,60	71,9	30,9	
AREIA DE GRADUAÇÃO MÉDIA	8,7 %		40	0,42	6,00	64,60	65,8	28,2	
AREIA DE GRADUAÇÃO FINA	9,4 %		60	0,25	14,00	50,60	51,5	22,1	
SILTE + ARGILA	12,7 %		100	0,15	16,10	34,50	35,1	15,1	
	100,0 %		200	0,075	5,50	29,00	29,5	12,7	

