



# **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

Gabriel de Sousa Ferreira

## SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA EROSÃO SUPERFICIAL DO SOLO PELA AÇÃO DA ÁGUA

Palmas – TO

2017



# **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

Gabriel de Sousa Ferreira

## **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA EROSÃO SUPERFICIAL DO SOLO PELA AÇÃO DA ÁGUA**

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

Orientador: Prof. Dra. Elizabeth  
Hernández Zubeldia.

Palmas – TO

2017

Gabriel de Sousa Ferreira

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA EROSÃO SUPERFICIAL DO SOLO PELA  
AÇÃO DA ÁGUA

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

Orientador: Prof. Dra. Elizabeth  
Hernández Zubeldía.

Aprovado em 23 de MAIO de 2017.

BANCA EXAMINADORA



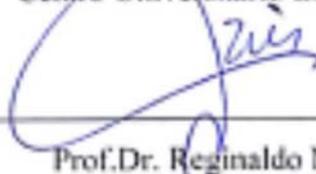
---

Prof.ª Dra. Elizabeth Hernández Zubeldía  
Centro Universitário Luterano de Palmas



---

Prof.ª Esp. Kenia Parente Lopes Mendonça  
Centro Universitário Luterano de Palmas



---

Prof.Dr. Reginaldo Naves dos Reis  
Centro Universitário Luterano de Palmas

Palmas – TO

2017

Dedico este trabalho aos meus pais,  
minha irmã, e a todos que diretamente  
ou indiretamente contribuíram.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas conquistas que tem me proporcionado e todas as bênçãos que venho recebendo ao longo de minha vida.

Aos meus pais, Sra. Joana Dark e Sr. Silvio Gomes, que sempre deram o máximo de si para proporcionar as melhores condições, acreditando e incentivando a batalhar para conquistar.

A minha irmã Glêndara que com seus conselhos de livre e espontânea pressão sempre me ajudaram em todos os aspectos e ao meu Cunhado Warley, que com sua paciência e sabedoria soube passar o conhecimento e manter sempre firme nos propósitos.

Aos meus padrinhos pelas palavras de força nos momentos difíceis.

A Ana Clara que de forma espetacular apoiou e incentivou, sempre com sua paciência, carinho e compreensão, e de forma infinita com sua ajuda.

Ao minha orientadora, professora Elizabeth Hernández Zubeldia, primeiramente pela paciência, confiança, apoio e a disponibilidade.

Aos amigos André (Bebezão), Guilherme Avelar (pequi), Clair, Erika Renata, Tabita Holanda, Samyr, Bruno Carvalho, Sueleide, agradeço pela ajuda, e pelos momentos de alegria e sofrimentos que juntos superamos, e de forma especial a Wanessa Rolim e Melk Zedek, que de forma ímpar sempre contribuíram diretamente para o crescimento e de forma solidária por várias vezes foram mentores e incentivadores.

A todos muito obrigado.

## RESUMO

FERREIRA, Gabriel de Sousa. **Simulação computacional da erosão superficial do solo pela ação da água**. 2017. 64 folhas. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2017.

O presente trabalho expõe o resultado da simulação computacional, para problemas de erosão superficial utilizando o método numérico *Smoothed Particle Hydrodynamics* – *SPH*. Na abordagem proposta neste trabalho, a água e o sedimento são tratados como fluidos newtoniano e pseudo-newtoniano, respectivamente, utilizando uma partícula em cada ponto do espaço físico. Foram levantados os parâmetros necessários para o emprego do *SPH* os dados disponíveis na área estudo, a fim de compatibilizar a simulação com o experimento. Após definir os critérios que melhor atendeu o resultado do experimento analisou-se a influencia das variáveis empíricas dentro do modelo, fixando um parâmetro a cada simulação. Os resultados de simulações de ensaios de canal aberto de fluxo unidirecional mostram a capacidade do modelo utilizado ao reproduzir de forma satisfatória a quantidade de material removido da superfície do leito. O parâmetro empírico do coeficiente de rugosidade do leito influencia diretamente na massa de sedimento transportada. Além disso, é possível estimar as interfaces entre os diversos materiais existentes no processo de erosão.

**Palavras-Chave:** transporte de sedimentos, modelos numéricos, SPH, simulação computacional.

**ABSTRACT**

FERREIRA, Gabriel de Sousa. **Computational simulation of soil erosion by water action**. 2017. 64 pages. Graduation work. - Civil Engineering Course, Lutheran University Center of Palmas, Palmas / TO, 2017.

The present work presents the results of the computational simulation for surface erosion problems using the Smoothed Particle Hydrodynamics - SPH numerical method. In the approach proposed in this work, water and sediment are treated as Newtonian and pseudo-Newtonian fluids, respectively, using a particle at each point in the physical space. The necessary parameters for the use of SPH were the data available in the study area, in order to make the simulation compatible with the experiment. After defining the criteria that best met the result of the experiment, the influence of the empirical variables within the model was analyzed, setting a parameter for each simulation. The results of unidirectional flow open channel test simulations show the ability of the model used to satisfactorily reproduce the amount of material removed from the bed surface. The empirical parameter of the bed roughness coefficient directly influences the sediment mass transported. In addition, it is possible to estimate the interfaces between the various materials in the erosion process.

**Keywords:** sediment transport, numerical models, SPH, computational simulation

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Tipos de erosão. ....	22
Figura 2. Esquema dos processos de transporte. ....	25
Figura 3 - Esquema do perfil de velocidades ....	30
Figura 4 – Processo iterativo para o cálculo da velocidade cisalhante.....	31
Figura 5 – Esquema das diferentes regiões do modelo de erosão ....	35
Figura 6 - Código entrada (XML). ....	35
Figura 7 – Esquema do canal hidráulico modelo. ....	36
Figura 8 – Esquema do canal hidráulico modelo. ....	36
Figura 9 - Geração do caso para simulação.....	37
Figura 10 - Contorno da simulação. ....	37
Figura 11 - Execução DualSphysics.....	38
Figura 12 - Arquivos resultantes da simulação ....	38
Figura 13 - Demonstração partícula ....	39
Figura 14 - Função calculadora Paraview. ....	40
Figura 15 – Filtro para definir contorno do coletor.....	40
Figura 16 - Reservatório coletor.....	41
Figura 17 – Filtro para visualização de partículas no reservatório.....	42
Figura 18 - Partículas de solo no reservatório coletor.....	43
Figura 19 - Tabela exportação de dados.....	43
Figura 20 - Simulação x Tempo de Execução (h) ....	46
Figura 21 – Configuração caso 2D no DualSphysics.....	47
Figura 22 - Malha de pontos x $dp$ ....	49

Figura 23 - tempo de processamento entre $dp$ .....	49
Figura 24 - Definição da malha x avanço da onda a 8,2s.....	51
Figura 25 - ( $dp$ ) x tempo de chegada ao coletor.....	52
Figura 26 - Massa de material para $t = 18s$ . ....	55
Figura 27 - Massa de material para $t = 18s$ relações validas.....	56
Figura 28 - Massa coletada com a variação do diâmetro médio das partículas.....	58
Figura 29 - Massa coletada com a variação da densidade do solo. ....	59

**LISTA DE QUADROS**

Tabela 1 - Fração granulométrica, segundo ABNT NBR 6502/95. ....	21
Tabela 2 - Parâmetros para simulação e análise paramétrica. ....	44
Tabela 3 - Resoluções da malha de pontos testadas. ....	48
Tabela 4 - Variação do $k_s$ x $dp$ . ....	50
Tabela 5 - Resultado massa coletada.....	54
Tabela 6 - Parâmetros validos para simulação .....	57
Tabela 7 – Simulação para análise de influência d50.....	57
Tabela 8 – Simulação para análise de influência da densidade do solo .....	59

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SPH	Smoothed Particles Hydrodynamics
GPU	Graphic Processing Unit
KG	Quilograma
CPU	Central Processing Unit
CFD	Dinâmica de Fluidos Computacional
$K_s$	Coefficiente de rugosidade equivalente do grão
$D_{50}$	Diâmetro médio das partículas
$N_p$	Número de partículas

## SUMARIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1. Objetivos .....	15
1.1.1. Objetivo Geral .....	15
1.1.2. Objetivos Específicos .....	15
1.2. Justificativa .....	16
1.3. Problema .....	17
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
2.1. Solo .....	18
2.1.1. Formação e classificação dos solos .....	18
2.1.2. Estrutura dos solos.....	19
2.1.3. Solos coesivos .....	19
2.1.4. Solos não coesivos.....	20
2.1.5. Granulometria.....	21
2.2. Erosão do solo .....	21
2.3. Erodibilidade .....	23
2.4. Transporte de sedimentos Fluxo de Canal Aberto .....	23
2.5. Modelos matemáticos.....	27
2.5.1. Modelos numéricos .....	27
2.6. O método Smoothed Particles Hydrodynamics (SPH) .....	28
2.7. Simulação da erosão superficial com SPH utilizando o critério de Shields	29
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>33</b>
3.1. Descrição do código do Código .....	34

3.1.1.	Experimento Simulado .....	36
3.1.2.	Execução da simulação.....	37
3.2.	Simulação computacional de ensaio laboratorial.....	39
3.3.	Análise paramétrica.....	44
3.3.1.	Alteração do diâmetro médio das partículas $d_{50}$ .....	45
3.3.2.	Alteração da densidade do sólido .....	45
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>46</b>
4.1.	Simulação do ensaio experimental de (ZUBELDIA et al., 2016).....	46
4.1.1.	Simulação computacional.....	47
4.1.2.	Definição da malha de pontos .....	50
4.2.	Análise quantitativa de material transportado.....	54
4.3.	Análise de influência de variação paramétrica.....	57
4.3.1.	Variação do diâmetro médio das partículas.....	57
4.3.2.	Variação da densidade do solo. ....	59
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>61</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>63</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Considera-se erosão como um conjunto de processos de degradação de materiais proveniente de rochas e solo, transportados de um ponto a outro pelos agentes erosivos, no qual envolve vários critérios de classificação quanto a erosão e processo erosivo. Para fins geotécnicos, optou-se pela divisão prática conforme metodologia adotada por (CAMAPUM et al., 2006) que consiste na divisão em dois tipos: erosão superficial e erosão interna.

A erosão superficial acontece devido ao escoamento da água que não se infiltra. Ela está associada ao transporte de partículas ou agregados, arrancados pela força cisalhante desenvolvida entre a água e o solo. Já a erosão interna (ou piping) origina canais no interior do solo e avança em sentido oposto ao sentido do fluxo. Por isso é chamada também de erosão regressiva. Esse processo pode evoluir para grandes cavidades no subsolo e é muito comum em barragens de terra e enrocamento.

Os modelos numéricos são uma ferramenta valiosa no estudo dos processos erosivos, permitindo descrever os mecanismos fundamentais que controlam a erosão, bem como a interação entre eles. No entanto, devido a erosão ser um processo que depende de vários fatores, a modelagem numérica é extremamente complexa, uma vez que deve considerar, inicialmente, a interação solo-água, com o conseqüente arrasto e deposição das partículas de solo o que classifica como um problema de grandes deformações difícil de ser abordado por métodos clássicos. Nesse sentido, a simulação computacional atua como facilitadora da modelagem fenomenológica, garantindo a confiabilidade dos resultados e a redução do tempo de estimativa.

Pesquisas aplicadas ao estudo da erodibilidade e fatores condicionantes da resistência à erosão, dentro do campo da geotécnica, ainda são escassas quando comparadas aos problemas ocasionados pelas mesmas. A dificuldade de quantificação tangencial na obtenção das pequenas magnitudes de tensões envolvidas e da necessidade da representação de complexas condições ambientais, que se faz jus a necessidade da aplicação direta de métodos numéricos que serão abordados neste trabalho, auxiliados por simulação computacional.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é simular computacionalmente o processo de transporte e deposição de partícula em leitos granulares sob condições de fluxo unidirecional.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Descrever as principais características que permitem utilizar o código DualSphysics para a simulação da erosão superficial em condições de fluxo unidirecional;
- Realizar simulações de experimentos laboratoriais utilizando o código DualSphysics;
- Realizar uma análise paramétrica para determinar a influência dos parâmetros do modelo numérico no resultado da simulação, usando como base os resultados de ensaios laboratoriais.

## 1.2. Justificativa

O assoreamento é um dos problemas que provocam a redução da quantidade de água útil nos reservatórios, impactando, conseqüentemente, a redução na quantidade de energia gerada. Nesse sentido, (CABRAL, 2005) destaca que a principal causa dessa problemática é a água da chuva que transporta sedimentos em suspensão ou diluição e que são retidos através da sedimentação/decantação e pelo atrito com a superfície de fundo. O autor (CABRAL, 2005) destaca que os sedimentos, sujeitos ao arrasto, são retidos na entrada do reservatório e nos afluentes formando um delta pluvial(CABRAL, 2005).

Visando o estudo desse problema, pode-se utilizar alguns modelos matemáticos, sejam eles determinísticos ou não determinísticos, para simular e prever determinados comportamentos e permitir a busca de soluções possíveis em curto prazo. No entanto, no campo da geotécnica, há uma carência em modelos aplicáveis a precisão de erosão de solo e transporte de sedimentos dado a complexibilidade dos fatores a serem levados em consideração.

Segundo Vilella & Mattos (1975), existem dois segmentos de estudos do transporte de sedimentos e deposição são eles: a) escola determinista, que procura equacionar o fenômeno físico do transporte de sedimentos; b) escola estocástica, que procura relações entre as variáveis através e diretamente de dados medidos em campo.

Outra abordagem possível é por meio de métodos numéricos que visem solucionar as equações fundamentais que governam os fenômenos. Essas equações são chamadas de Equações de Navier Stokes e são um conjunto de equações diferenciais parciais que não tem solução. Por esse motivo, é necessário utilizar métodos numéricos para achar uma solução aproximada.

Considerando as limitações inerentes aos métodos numéricos clássicos para simular problemas de grandes deformações propõe-se utilizar o método Smoothed Particles Hydrodynamics (SPH), que consiste em um método computacional utilizado para simulação de fluidos. Neste caso utilizado para discretização das equações que possa levar ao a um melhor entendimento do fenômeno físico da erosão superficial.

Para aperfeiçoar os resultados e minimizar a falha humana a associação dos métodos numéricos à abordagem constitui-se uma importante ferramenta para simulação e, conseqüente, redução de tempo, custos e maior confiabilidade dos resultados.

### **1.3. Problema**

A redução do volume de água utilizável em lagos e reservatórios é proveniente em sua grande maioria pelo assoreamento, dado através da erodibilidade do solo, reduzindo assim a potencialidade da sua finalidade como por exemplo a geração de energia elétrica. As mensurações dos fenômenos são de grande valia, dado a importância do planejamento quanto a medidas mitigadoras do impacto das atividades que possam produzir os sedimentos.

O transporte dos sedimentos em suspensão ou diluição que são retidos através da sedimentação/decantação e pelo atrito com o fundo do reservatório, leito, é dado pelo gradiente hidráulico.

Segundo RAMOS (1999), para o transporte de sólidos em suspensão há duas modalidades, uma corresponde à carga de lavagem da bacia e a outra refere-se ao transporte dos materiais que integram o leito. E que de acordo com CARVALHO (2000), existe uma tendência natural para que o sedimento seja depositado quando o fluxo encontrar água com menor velocidade (gradiente hidráulico), começando a se depositar, conforme a granulometria das partículas, de acordo com a turbulência do escoamento.

Em geral, os modelos empíricos estão limitados a descrever o mecanismo fundamental da erosão, ao qual foi submetido inicialmente, não podendo alterar as condicionantes do meio físico padrão. Sendo assim com o aumento da tecnologia há uma necessidade da previsão de fenômenos erosivos, voltados para o contexto da engenharia civil, ou geotécnica.

Diante do problema disposto, a pergunta é: Como realizar simulação de problemas de erosão superficial pela ação da água utilizando métodos numéricos?

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Solo**

A definição da palavra solo é variável de acordo com a área de aplicação. Segundo Caputo (2006), a formação dos solos é resultado do intemperismo ou desintegração mecânica ou química.

Ao que tange a engenharia civil, observa-se a definição de Vargas (1977), que sintetiza a aplicabilidade do termo solo, do ponto de vista técnico, onde os solos são materiais da crosta terrestre que servem de suporte, podendo ser arrimados, escavados e ou perfurados, utilizados nas mais diversas obras.

Por meio de agentes como a temperatura, água, vegetação e vento, nota-se o processo de desintegração mecânica, que dá origem a pedregulhos, areias, siltes e quando em condição específica forma-se argila. Já por desintegração química, entende-se o que ocorre quando há modificação química ou mineralógica da rocha de origem, tendo como principal agente a água, utilizando os seguintes mecanismos: oxidação, hidratação, carbonatação, dentre outros (CAPUTO, 2006).

#### **2.1.1. Formação e classificação dos solos**

Solos são o produto final de misturas complexas, unindo matérias inorgânicas, resíduos orgânicos e parcialmente decompostos. De maneira geral o solo é um dos mais importantes produtos do intemperismo, fazendo a diferenciação dos solos de área a área, levando em consideração a quantidade, camadas, aspectos físicos, observando tanto quantitativamente, quanto qualitativamente.

A transformação dos solos dá-se pelo processo de intemperismo, onde a continuidade do processo, resulta na redução da granulometria das partículas. Levando em consideração os principais fatores do intemperismo as seguintes condicionantes:

ação do homem, rocha de origem, clima, estágio de desintegração/decomposição, condições topográficas.

Quanto a classificação dos solos, divide-se em três grandes grupos são eles: Sedimentares, residuais ou de formação orgânica.

O primeiro grupo, são solos que permaneceram no local de origem da rocha, formando uma transição gradual de solo até a rocha, caracterizando como laterítico, com alto índice de porosidade e expansão.

No segundo grupo, engloba os solos sedimentares, os quais sofrem ação dos seguintes agentes transportadores: água (aluvionares), pelo vento (eólico), gravidade (coluvionares) e por fim os transportados pelas geleiras (glaciares).

Por último os solos de formação orgânica, seja da natureza vegetal (por meio de plantas e raízes), seja animal (conchas marítimas).

### **2.1.2. Estrutura dos solos**

Conforme Vargas (1977), a estrutura de um solo pode ser definida como o arranjo ou configuração das partículas do solo entre si. Entre os fatores que afetam a estrutura do solo estão a forma, o tamanho dos grãos e composição mineralógica.

Em geral os solos classificam-se em dois grandes grupos:

- Solos coesivos e;
- Solos não coesivos.

### **2.1.3. Solos coesivos**

De acordo com Van Rijin (1993) solos coesivos: são aqueles nos quais as forças internas que fazem a união entre as partículas são significantes, criando assim uma atração ou coesão entre as partículas. Em sua grande maioria estes sedimentos

possuem normalmente uma granulometria com partículas de diâmetros menores que 200  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Nesta faixa encontram-se partículas menores como argila e silte ( $<62 \mu\text{m}$ ), e areias finas (62-200  $\mu\text{m}$ ).

Para Vargas (1977), o estado disperso é onde cada uma das partículas pode sedimentar muito lentamente ou permanecer em suspensão. O sedimento formado pela decantação das partículas individuais tem estrutura dispersa, e todas as partículas estão orientadas mais ou menos paralelas umas às outras.

Quando existe um potencial atrativo, elas podem no seu movimento ser captadas umas pelas outras e sedimentar-se em flocos constituindo a floculação. Assim, o potencial atrativo repulsivo pode ser influenciado pela condição iônica da água e também, pela presença de cátions nas bordas das partículas de argila. (DAS, 2007).

#### **2.1.4. Solos não coesivos**

Van Rijin (1993) define solos não coesivos como sendo aqueles nos quais as forças que prendem as partículas umas às outras não são significantes, não criando assim, uma atração ou coesão entre as partículas, pode ser definido por possuírem partículas de diâmetros maiores que 200  $\mu\text{m}$ .

Solos não coesivos pode ser dividido em grãos isolados ou alveolares. De acordo com DAS (2007), a forma do solo no tocante ao grande intervalo de índices de vazios pode advir da forma e distribuição das partículas do solo, levando em consideração suas posições relativas influenciando sobre a densidade do agrupamento. Desta forma solo com estruturas alveolares, apresentam um alto índice de vazios, e como consequência uma grande susceptibilidade ao recalque caso este solo seja submetido a cargas elevadas.

### 2.1.5. Granulometria

De acordo com as dimensões das partículas de solo, as suas frações constituintes recebem uma classificação, que é dada por uma escala. Essa classificação, chamada de classificação granulométrica das partículas, é feita segundo seus diâmetros equivalentes, conforme a escala granulométrica da ABNT NBR 6502/95 (Tabela 1).

Tabela 1 - Fração granulométrica, segundo ABNT NBR 6502/95.

Fração granulométrica	Diâmetro equivalente
Matacão	$200 < D_{50} < 1000 \text{ mm}$
Pedra de mão	$60 < D_{50} < 200 \text{ mm}$
Pedregulho	
pedregulho grosso pedregulho médio	$20 < D_{50} < 60 \text{ mm}$
pedregulho fino	$6,0 < D_{50} < 20 \text{ mm}$
Areia	
areia grossa areia média areia fina	$0,6 < D_{50} < 2,0 \text{ mm}$
	$0,2 < D_{50} < 0,6 \text{ mm}$
Silte	$0,002 < D_{50} \leq 0,06 \text{ mm}$
Argila	$D_{50} \leq 0,002 \text{ mm}$

Fonte: ABNT (1995).

### 2.2. Erosão do solo

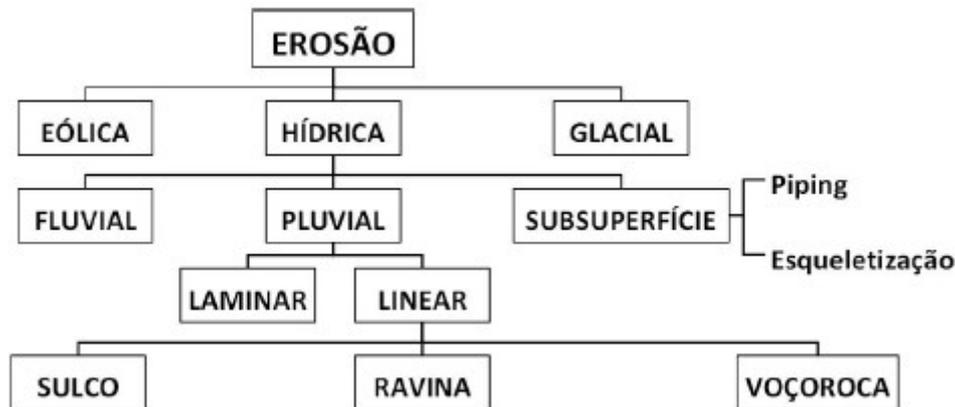
Erosão, termo que provém do latim “erodere” cujo significado é corroer, tem variadas definições encontradas na literatura. Em uma definição abrangente, podemos considerar erosão como um conjunto de processos pelos quais os materiais da crosta terrestre são degradados, dissolvidos ou desgastados e transportados de um ponto a outro pelos agentes erosivos, tais como as geleiras, os rios, os mares, o vento ou a chuva. Particularizando, a erosão onde o agente é a água é chamada de erosão hídrica (Bastos,1999).

Camapum et al. (2006), define erosão como o termo aplicado aos processos de desgastes da superfície terrestre devido a ação de elementos naturais ou antropogênicos. Para Lima (2003), a erosão de solos afeta a vida de varias maneiras, por isto o assunto envolve diversos profissionais, de várias áreas do conhecimento, com visões distintas sobre o mesmo problema. Desta forma, nota-se a abrangência das linhas de pesquisas na área da geologia, geotécnica, agronomia e demais áreas de conhecimento.

Os processos erosivos, podem ser divididos em três etapas: desprendimento dos agregados do solo, transporte e deposição das partículas. Estes processos tendem a ser induzidos principalmente por meio do transporte de partículas por fluxo subsuperficiais, ou pela ação das gotas de chuva e da força cisalhante do escoamento (Mendes, 2006).

De forma simplificada pode-se observar na Figura 1, como são divididas e subdivididas as erosões de acordo com seu agente.

Figura 1. Tipos de erosão.



Fonte: Jesus (2013)

Nota-se que no geotécnico há tendência ao estudo da erosão provocada pela ação da água, chamada de erosão hídrica, que tem como agente erosivo a chuva e fluxos contínuos de água, e que pode ocorrer das mais diversas formas:

- *Erosão Superficial*: geralmente ocasionado pela ação da chuva, seja pelo impacto das gotas de chuva no solo, ou pelo escoamento superficial;

- *Erosão interna (piping)*: processo de erosão subterrânea, ocasiona a remoção das partículas através da percolação de água.
- *Voçoracamento*: união de vários mecanismos de erosão, geralmente envolve os seguintes processos: erosão interna, erosão superficial e movimento de massa.

### **2.3. Erodibilidade**

Pode-se dizer que a erosão não é a mesma em todos os solos, pois suas propriedades físicas/químicas e biológicas variam conforme seus processos de formação. O termo erodibilidade pode ser definido como o índice que quantifica a probabilidade com que as partículas de um solo tendem a ser destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo tais como a água BACELLAR (2000).

Também se pode caracterizar erodibilidade, a diferença de comportamento entre solos, sob os mesmos fatores erosivos, tal como, a chuva, declividade do terreno bem como a cobertura vegetal. Onde alguns solos são mais susceptíveis à erosão, evidenciando o fator de erodibilidade, que está ligado intrinsecamente às propriedades físico/química do solo, e aos agentes erosivos ao qual está submetido.

É de suma importância a quantificação das causas de destacamento e transporte de solo, para a previsão da erosão e planejamento do uso do solo. Toda via o fator de erodibilidade é estudado com maior afinco na área geotécnica.

### **2.4. Transporte de sedimentos Fluxo de Canal Aberto**

Fluxo de canal aberto é definido como aquele cuja superfície se encontra sob pressão atmosférica. Este tipo de fluxo aparece em rios e canais naturais e artificiais, em cujo leito pode acontecer erosão superficial. As características do fluxo da água e sua interação com o leito de sedimentos têm sido estudados e descritos por meio de modelos

empíricos dentro de uma área da engenharia denominada “hidráulica de canais”. Entretanto, os conceitos desenvolvidos são de grande utilidade para o estudo de assoreamento de rios e cursos da água.

O movimento da água em direção à saída de uma bacia hidrográfica flui sobre as rochas e os solos que formam ou revestem as vertentes e as calhas da rede de drenagem.

Os obstáculos que então encontra determinam os caminhos que ela vai seguir e a velocidade com que se deslocará, e dissipam boa parte de energia de que está provida, ao propiciar que partículas sólidas sejam removidas e transportadas vertente ou rio abaixo, pelo fluxo líquido (TUCCI, 2001).

De acordo com CARVALHO (2008), a quantidade total de material removido numa bacia hidrográfica é conhecida como erosão bruta ou erosão total, que inclui material particulado e dissolvido.

Entretanto, nem todo o material que é destacado de seu local de origem é transportado para fora da bacia, dados o grau de seletividade de grãos que cada modalidade de erosão apresenta no processo de remoção e transporte e a dinâmica hidrológica dos canais de drenagem da área em questão.

A erosão referente apenas ao sedimento transportado para fora da área de drenagem é denominada erosão efetiva, denominação essa, também utilizada para a contribuição ou produção de sedimento.

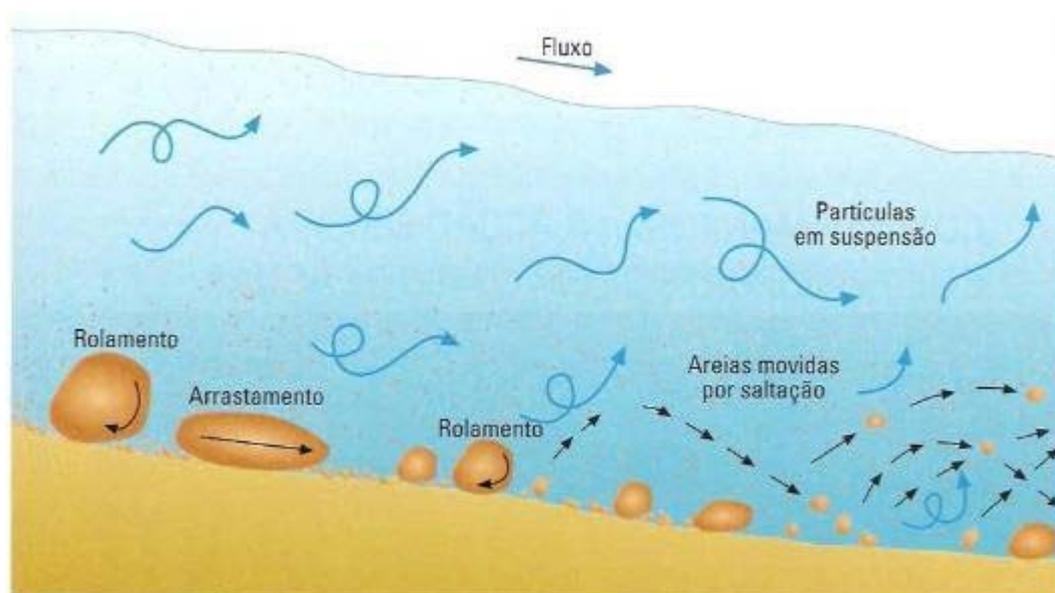
Quando considerada, a produção de sedimento a jusante do ponto de medição e comparada com a quantidade de material removido, é denominada de taxa de transferência ou coeficiente de remoção de sedimento.

De acordo com PAIVA (2001), o transporte das partículas se dá pelo carreamento pelo fluxo dos rios de três maneiras:

- *Transporte por arraste*: representada pelas partículas de areia, cascalho ou fragmentos de rocha que rolam, deslizam ou saltam ao longo do leito, a saltação ocorre quando os grãos são elevados e transportados como partículas até serem depositados novamente no leito;

- *Suspensão*: representada pelas partículas de silte e argila que se conservam em suspensão no fluxo d'água;
- *Dissolvida*: representada pelos constituintes intemperizados das rochas que são transportados em solução química no fluxo d'água.

Figura 2. Esquema dos processos de transporte.



Fonte: BROWN (1999)

De acordo com Figura 2, aponta-se a seguinte classificação:

- *Deslizamento*: neste tipo de transporte as partículas, geralmente com forma lamelar, ou seja, esfericidade muito diferente do valor unitário, deslizam sem perder contato com o leito do rio.
- *Rolamento*: ocorre quando as partículas possuem forma arredondada, ou seja, esfericidade semelhante a unidade, o que pode ser verificado na Figura 2 e faz com que as partículas rolem sobre o leito sem perder contato com este. Este tipo de transporte incide, assim como o anterior, quando a intensidade das forças hidrodinâmicas sobre o leito (arraste e sustentação) são de magnitude tal que a sustentação não consegue superar o peso das partículas (SOUSA, 2011). Quando

o escoamento alcança energia suficiente para suspender as partículas do leito, as partículas que estavam em rolamento vão passar a constituir saltação.

- *Saltação*: segundo Português (2008), “[...] nesta forma de transporte, as partículas deslocam-se por saltos, alternando as fases de transporte por arrastamento e as fases de transporte em suspensão.”. Sendo que a caracterização deste transporte pode ser contemplada na Figura 2. Assim este regime de transporte pode ser considerado de característica intermediária e ocorre quando o escoamento possui energia suficiente para desprender as partículas do leito, mas não para mantê-las em suspensão.
- *Suspensão*: ainda de acordo com Português (2008), “[...] no transporte em suspensão as partículas sólidas são deslocadas no seio da água, sem contato com o leito.”. Este tipo de transporte carrega partículas mais finas, que se mantêm suspensas no escoamento por longos trajetos, como verificado na Figura 2 .
- *Turbidez*: quando os sedimentos se encontram dispersos dentro do fluido, eles são transportados por turbidez. Este tipo de interação entre água e sedimento dificilmente é desfeita, sendo que mesmo que a energia do escoamento diminua, o sedimento continuará disperso na água e dificilmente se depositará no leito, como pode ser verificado na Figura 2. Este é o sistema de transporte em que a maioria dos poluentes é carregada sendo, portanto de grande importância para os estudos de cunho ambiental.

## 2.5. Modelos matemáticos

Para Barth et al. (1987), um modelo é uma representação do comportamento de um sistema natural possível de ser expresso por meio de equações matemáticas e que, dada a versatilidade que possui, pode-se facilmente modificar a sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas.

Apesar das complexidades do processo e das equações envolvidas, tem-se alcançado formulações matemáticas para a análise de fenômenos erosivos. Os modelos matemáticos existentes podem ser divididos em dois grandes grupos: os modelos empíricos e os numéricos.

Sendo assim, neste trabalho será utilizada a abordagem numérica, na utilização do método SPH disposto no código DualSphysics, para que se possa verificar a viabilidade da reprodução de experimentos laboratoriais de canal de fluxo aberto, utilizando ferramentas computacionais.

### 2.5.1. Modelos numéricos

A Dinâmica de Fluidos Computacional (em inglês, *CFD*) abrange os métodos numéricos, fundamentados na Hipótese do Contínuo, que são utilizados para a simulação de processos físicos que apresentam escoamento.

Os modelos numéricos são uma ferramenta muito valiosa no estudo dos processos erosivos, permitindo descrever os mecanismos fundamentais que controlam a erosão, bem como a interação entre eles. No entanto, devido ao fato de ser um processo que depende de inúmeros fatores, a modelagem numérica dos fenômenos erosivos é uma tarefa extremamente complexa.

O primeiro aspecto que precisa ser resolvido é a modelagem correta da interação solo- água, com o conseqüente arrasto e deposição das partículas de solo. Trata-se de um problema de grandes deformações, difícil de abordar com os métodos numéricos clássicos.

Existem, basicamente, duas abordagens numéricas no que tange o transporte de sedimentos, são elas:

- Abordagem Lagrangeana: descreve o movimento de cada partícula, acompanhando-a em sua trajetória, como se o sistema de referência se deslocasse simultaneamente com a partícula. As propriedades das partículas individuais são observadas como uma função do tempo.
- A Euleriana: se escolhe uma seção ou um volume de controle no espaço e se consideram todas as partículas que passem por esse local, num intervalo de tempo. Em outras palavras, o sistema de referência permanece fixo enquanto as partículas se movimentam.

## 2.6. O método Smoothed Particles Hydrodynamics (SPH)

O SPH (em inglês, *Smoothed Particle Hydrodynamics*) é um método de partículas, sem malha, Lagrangeano, que foi desenvolvido inicialmente para resolver problemas de astrofísica (Gingold & Monaghan, 1977; Lucy, 1977). O método tem sido amplamente utilizado no estudo de fluxo dinâmico de fluidos, daí o termo “hidrodinâmico”, que é a sua principal área de utilização.

Atualmente ele é usado em muitas áreas de pesquisa, incluindo a resposta dinâmica de materiais com resistência (sólidos) (Liu & Liu, 2010) e problemas multifásicos (Monaghan, 1995; Hu & Adams, 2007)

No método SPH, as partículas são usadas para representar tanto a geometria do problema como os materiais usados. Cada partícula carrega propriedades de campo (velocidade, densidade, etc.) e é usada como um nó para efeitos de cálculo, ou seja, a discretização das equações de campo é realizada a partir destas partículas. Além disso, o valor das variáveis de campo em cada partícula é aproximado por uma função contínua, que depende do valor das partículas dentro de um determinado domínio no espaço, daí o termo “smoothed particles” ou “partículas suavizadas” (Liu & Liu, 2010).

## 2.7. Simulação da erosão superficial com SPH utilizando o critério de Shields

O critério hidráulico está fundamentado na teoria de Shields (1936). A relação analítica sugerida por Van Rijn (1993) é adotada para o critério:

$$\begin{aligned} \theta_c &= 0,010595 \ln(\text{Re}_*) + \frac{0,110476}{\text{Re}_*} + 0,0027197 && \text{para } \text{Re}_* \leq 500 \\ \theta_c &= 0,068 && \text{para } \text{Re}_* \geq 500 \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:  $\theta_c$  é o parâmetro crítico de Shields, que se relaciona com a tensão no leito, substituindo a tensão no leito ( $\tau_b$ ) por a tensão crítica ( $\tau_{b,c}$ )  $\therefore$

$$\theta_c = \frac{\tau_{b,c}}{(\rho_s - \rho)gD_{50}} \quad (2)$$

Onde:

$\theta_c$  É o parâmetro crítico de Shields

$g$  É a aceleração da gravidade;

$\rho_s$  É  $\rho$  a densidade do sólido e do fluido, respectivamente;

$D_{50}$  É o diâmetro médio das partículas.

Portanto, o parâmetro crítico de Shields representa a forma adimensional da tensão que dá início ao movimento das partículas.

O parâmetro crítico de Shields depende do número de Reynolds do sedimento, que é um valor adimensional que caracteriza um regime fluidodinâmico. A velocidade cisalhante depende da velocidade real. (Manenti et al. 2012), Fundamentados na teoria das misturas de Prandtl, definiram o perfil de velocidade real do fluxo como mostrado no esquema da Figura 3 e na equação:

$$\begin{aligned}
 u_{(z)} &= \frac{u_*^2}{\nu} z && \text{para } z \leq \delta \\
 \frac{u_{(z)}}{u_*} &= \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_o} \right) && \text{para } z > \delta
 \end{aligned} \tag{3}$$

Sendo:

- $z$  a posição, medida a partir do leito até a superfície livre;
- $\nu$  a viscosidade cinemática;
- $\kappa=0,41$  a constante de von Karman;
- $z_o$  o parâmetro de rugosidade do fundo e
- $u_{(z)}$  a velocidade da partícula da água mais próxima à partícula de sedimento cuja condição dinâmica (em repouso ou em movimento) está sendo avaliada.

A espessura da camada laminar ( $\delta_v$ ) é calculada como:

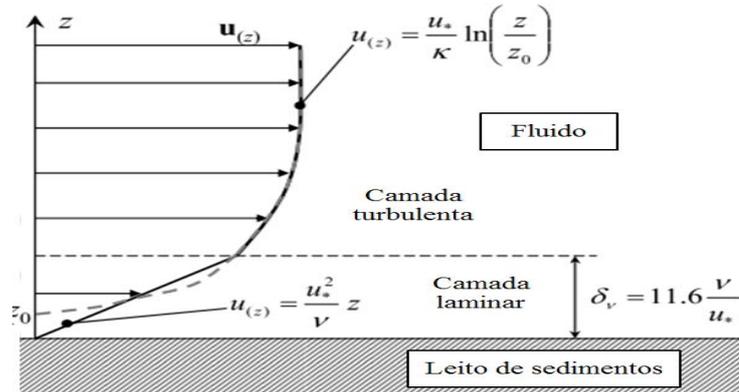
$$\delta_v = 11,6 \frac{\nu}{u_*} \tag{4}$$

O valor de  $z_o$  depende da condição dinâmica do fluido (suave ou rugoso) e pode ser calculado como:

$$z_o = \begin{cases} 0,11 \frac{\nu}{u_*} & \text{para } \frac{k_s u_*}{\nu} < 5 \quad (\text{fluxo suave}) \\ 0,033 k_s & \text{para } \frac{k_s u_*}{\nu} > 70 \quad (\text{fluxo rugoso}) \\ 0,11 \frac{\nu}{u_*} + 0,033 k_s & \text{para } 5 < \frac{k_s u_*}{\nu} < 70 \quad (\text{fluxo transicional}) \end{cases} \tag{5}$$

Onde,  $k_s$  é a rugosidade do grão equivalente, cujo valor é de 1 a 10 vezes o diâmetro médio das partículas.

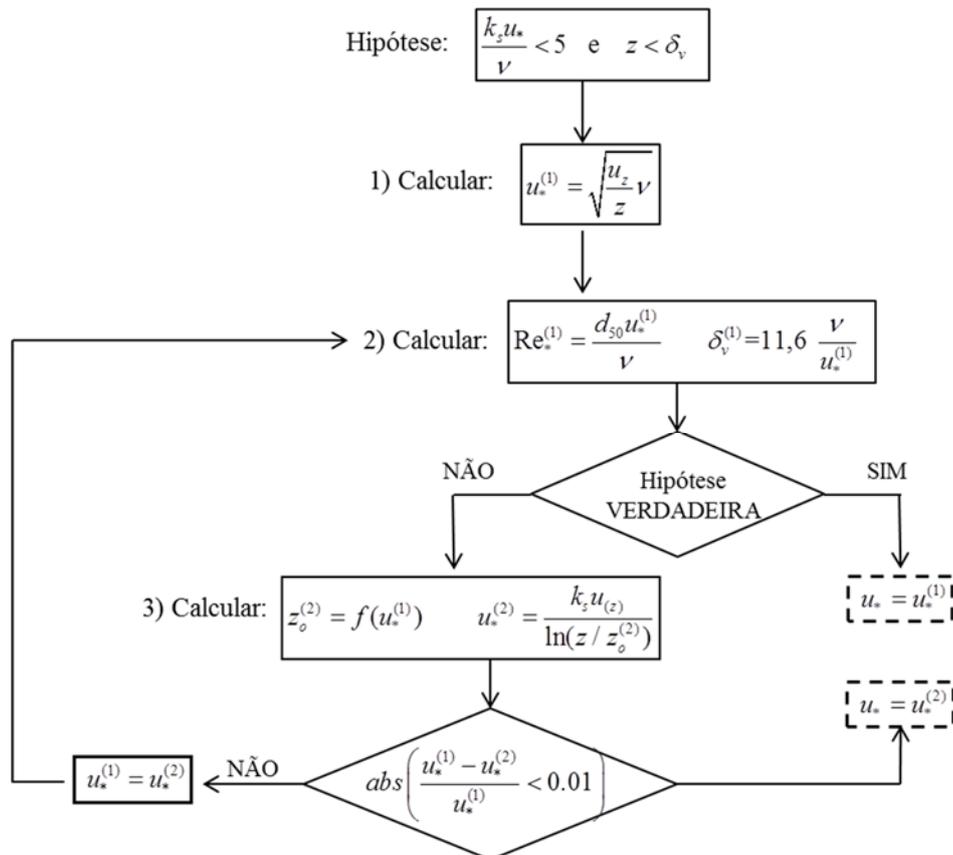
Figura 3 - Esquema do perfil de velocidades



(modificado de Manenti et al.(2012))

O perfil logarítmico de velocidade é comumente adotado nos modelos de transporte de sedimentos em canais abertos (Einstein, 1950; Van Rijn, 1984). Porém, o fato de depender de um critério hidráulico faz com que a equação (5) precise de um processo iterativo para ser resolvida. O processo iterativo foi implementado no DualSPHysics como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Processo iterativo para o cálculo da velocidade cisalhante



(modificado de Manenti et al.(2012))

A partícula de sedimento será movimentada quando a tensão atuante no leito calculada for maior que a tensão cisalhante crítica, calculada segundo a equação (3). Se o valor de tensão cisalhante crítica for atingido à partícula será movimentada, segundo o modelo HBP disponível no código. Na implementação original de Fourtakas (2014) a tensão de escoamento, é calculada segundo o critério de Drucker-Prager. Nesta variante, a tensão de escoamento será substituída pela tensão cisalhante crítica.

### 3. METODOLOGIA

O trabalho foi realizado em 2 etapas, onde a primeira, compreende a parte teórica e a segunda a prática, compostas da seguinte forma:

1º etapa:

- a) Pesquisa bibliográfica acerca dos modelos matemáticos numéricos;
- b) Compreensão do modelo numérico SPH e suas aplicações para simular o processo de erosão superficial;

2º etapa:

- a) Estudo do código *DualSphysics* para realização da simulação da erosão superficial;
- b) Aplicação do critério na simulação de um ensaio de laboratório;
  - b.1) Simulação do caso inicial;
  - b.2) Definição da malha de pontos de acordo com a variação dos parâmetros;
  - b.3) Análise paramétrica.

Na primeira etapa foi realizada uma pesquisa bibliográfica, quanto aos métodos numéricos matemáticos que descrevem os fenômenos erosivos, e os conceitos básicos para que se fosse possível compreender os resultados das simulações. Cumprindo assim o primeiro objetivo específico deste trabalho.

A segunda etapa seguiu o roteiro estruturado de acordo com as tarefas sequenciadas neste item, onde demonstra detalhadamente o procedimento realizado para cumprir cada atividade a fim de atender os demais objetivos específicos.

### 3.1. Descrição do código do Código

Após pesquisa de códigos que fazem a reprodução do *SPH*, foi utilizado o código *DualSphysics*. Cabe ressaltar que a escolha do código, foi embasada na grande publicação de artigos que utilizam, afim de minimizar os possíveis problemas de programação, pois o foco deste trabalho gira em torno da confirmação de possibilidade de reprodução do experimento supracitado.

O código aberto *DualSphysics* (Crespo et al., 2015), desenvolvido numa plataforma colaborativa entre a Universidade de Vigo (Espanha) e a Universidade de Manchester (Reino Unido), foi utilizado para simular um ensaio de erosão em um canal hidráulico.

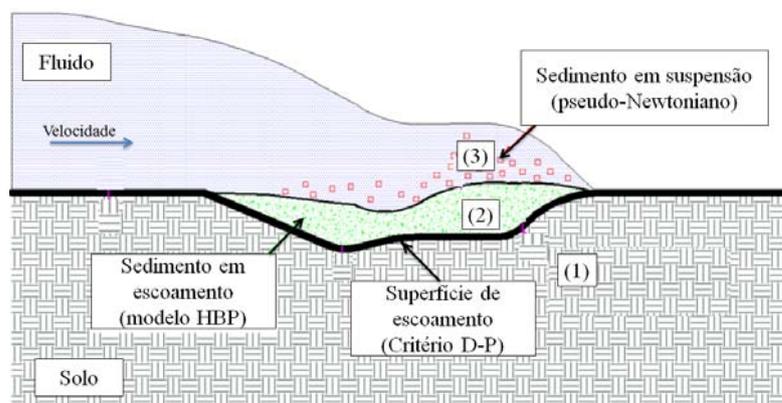
O código está escrito em C++ e C++ CUDA, o que permite que possa ser rodado na CPU (*Central Processing Unit*) com OpenMP ou numa placa NVIDIA, sendo que na versão GPU (*Graphic Processing Unit*), que roda nos processadores de placas de vídeo, é possível aumentar a velocidade de cálculo em 56 vezes, em média, a depender do hardware, em comparação com uma CPU de um único núcleo (Valdez-Balderas et al., 2013).

A possibilidade de se ter grandes velocidades faz com que o *DualSphysics* seja uma ferramenta muito atrativa para realizar a implementação de problemas multifásicos, já que estes geram um alto custo computacional.

O presente trabalho é realizado a partir da implementação realizada por (ZUBELDIA et al., 2016). O código disponível possui apenas a versão para GPU, e precisa ser rodado numa placa NVIDIA.

Na versão atual, três regiões são consideradas, conforme mostrado na Figura 5. A região (1) é formada pelo solo que compõe o leito e não é erodido pelo fluxo; a região (2) é formada pelo material cuja tensão é superior a tensão de escoamento e, portanto, é erodido.

Figura 5 – Esquema das diferentes regiões do modelo de erosão



Fonte: *DualSphics* (modificado de Fourtakas (2014))

A configuração de entrada da simulação foi dada pelo código conforme demonstrado na Figura 6, escrito em linguagem XML, que neste caso cria uma infraestrutura pra tabulação dos dados de entrada, encapsulando as características das partículas, solo, água e variáveis necessárias pra o processamento com seus respectivos valores iniciais.

Figura 6 - Código entrada (XML).

```

64         <mvrect duration="3" id="1">
65             <vel x="0" y="0" z="0.05"/>
66         </mvrect>
67     </objreal>
68 </motion>
69
70 -->
71 </casedef>
72 <execution>
73     <parameters>
74         <parameter key="DeltaSPH" value="0.1" comment="DeltaSPH parameter, 0 not applied (def=0)" />
75         <parameter key="DtIni" value="0.000000001" comment="Initial time step" />
76         <parameter key="DtMin" value="0.0000000001" comment="Minimum time step (def=0.00001)" />
77         <parameter key="TimeMax" value="19.0" comment="Time of simulation" />
78         <parameter key="TimeOut" value="0.1" comment="Time out data" />
79         <parameter key="IncZ" value="5" comment="Increase of Z+" />
80         <parameter key="PartsOutMax" value="50" comment="Proportion of fluid particles out allowed (def=1)" />
81         <parameter key="PhaseCount" value="2" comment="Number of different fluids" />
82         <parameter key="PhaseMkFluid_0" value="0" comment="MkFluid of fluid 1" />
83         <parameter key="PhaseRhop_0" value="1000" comment="Rhop value for fluid 1" />
84         <parameter key="PhaseCsound_0" value="50" comment="Csound value for fluid 1" />
85         <parameter key="PhaseGamma_0" value="7" comment="Gamma value for fluid 1" />
86         <parameter key="PhaseVisco_0" value="0.001" comment="Viscosity value for water" />
87         <parameter key="PhaseViscoCr_0" value="0.00" comment="Critical viscosity of sediment" />
88         <parameter key="PhaseViscoMax_0" value="0.00" comment="Maximum viscosity of sediment" />

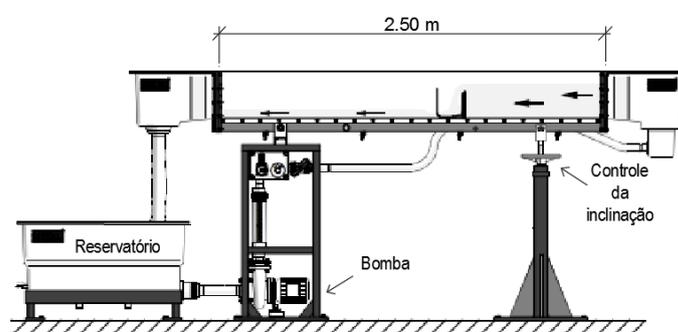
```

Portanto, os parâmetros de entrada necessários para a simulação são: diâmetro médio das partículas de solo, densidade do sólido e do fluido e rugosidade equivalente.

### 3.1.1. Experimento Simulado

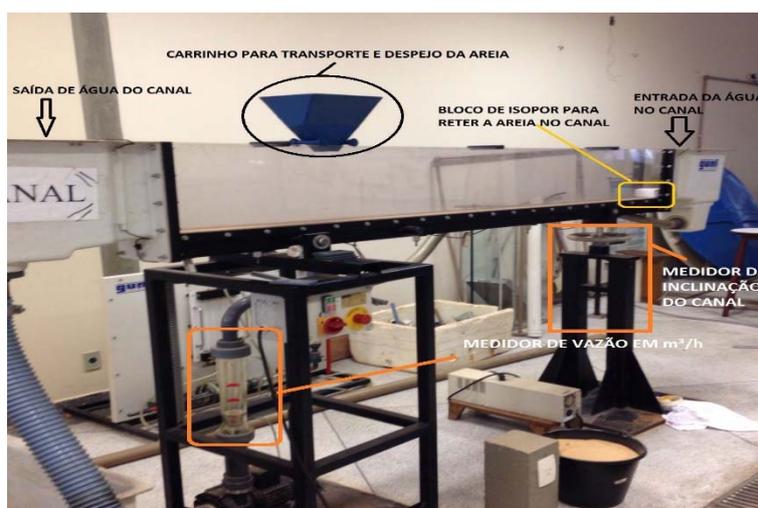
Para validar o modelo, foram realizadas comparações dos resultados obtidos no decorrer do experimento realizado em laboratório por (ZUBELDIA et al., 2016). A simulação em laboratório foi realizada conforme descrito a seguir: ensaio experimental em um canal hidráulico modelo HM 160, conforme características apresentadas na Figura 7. O canal permite a recirculação da água e pode ser adaptado para colocar um leito de areia no fundo. Desta forma, a erosão do leito será induzida pelo fluxo da água e o material arrastado será coletado no reservatório,

Figura 7 – Esquema do canal hidráulico modelo.



HM160 (modificado de GUNT Hambourg, (1997)).

Figura 8 – Esquema do canal hidráulico modelo.



Fonte: (ZUBELDIA et al., 2016)

De acordo com (ZUBELDIA et al., 2016), o canal possui as seguintes especificações: inclinação de  $-1,0\%$  e vai até  $3\%$ ; Reservatório tem capacidade de 280

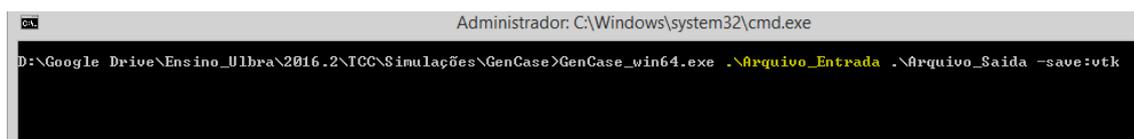
litros; A bomba gera um consumo de energia de 1,02 kW; Vazão máxima de 10,0 m<sup>3</sup>/h; Pesa aproximadamente 500 kg.

### 3.1.2. Execução da simulação

Esta etapa foi realizada dentro do ambiente *Windows*, plataforma que proporciona o melhor rendimento da integração *hardware/software*, utilizando os softwares *Microsoft Visual Studio*, *CUDA compilador* e o centro de aplicativos via terminal *CMD*, os passos para todas as simulações podem ser observados a seguir:

- a) Primeiramente fazem-se as alterações dos parâmetros iniciais no arquivo de entrada em formato XML, conforme demonstrado a Figura 6;
- b) Gera-se os demais arquivos utilizando o aplicativo *GenCase*, que gera a integração entre o contorno da simulação, descrito na Figura 9 e os parâmetros iniciais, resultando em dois arquivos: Arquivo de entrada no código *DualSphysics* em formato XML, e o arquivo binário que faz a distribuição das partículas e seus respectivos atributos (viscosidade, diâmetro, densidade, etc.). Os arquivos gerados foram aplicados diretamente no código gerando as condições necessárias para simulação, o mesmo pode ser observado no comando demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Geração do caso para simulação.



```

Administrator: C:\Windows\system32\cmd.exe
D:\Google Drive\Ensino_Ulbra\2016.2\TCC\Simulações\GenCase>GenCase_win64.exe .\Arquivo_Entrada .\Arquivo_Saida -save:vtk
  
```

- c) A título de análise superficial a Figura 10, demonstra graficamente o resultado da etapa b.

Figura 10 - Contorno da simulação.



- d) A execução da simulação que resulta dados expressivos para análise dá-se nesta etapa, onde é inserido os arquivos gerados anteriormente no código *DualSphysics* seguindo a ordem da Figura 11, e tem como resultante os arquivos em formato *vtk*, que fornecem a capacidade de visualização em imagem/vídeo a cada instante de tempo, demonstrado na Figura 12, que traz a mesma encapsulação de dados do código, alterada de forma a atualizar os valores de posição, velocidade e demais.

Figura 11 - Execução DualSphysics.

```
C:\Windows\system32\cmd.exe
D:\Google Drive\Ensino_Ulbra\2016.2\TCC\Simulações\Casos\caso_27_dp=0.002_ks_10_t=18s>..\Exe\DualSPhysics_Debug_GPU64.exe .\Big_Flume_lab002 .\ -sv:vtk
```

Os arquivos resultantes da simulação, Figura 12, foram analisado no software *ParaView*, que proporciona a visualização da simulação com base nos instantes de tempos.

Figura 12 - Arquivos resultantes da simulação

Nome	Data de modificaç...	Tipo	Tamanho
desktop.ini	21/02/2017 01:01	Parâmetros de co...	1 KB
MapCells.vtk	21/02/2017 00:10	Arquivo VTK	77.553 KB
PartVtk_0000.vtk	21/02/2017 00:10	Arquivo VTK	8.855 KB
PartVtk_0001.vtk	21/02/2017 00:13	Arquivo VTK	8.855 KB
PartVtk_0002.vtk	21/02/2017 00:17	Arquivo VTK	8.855 KB
PartVtk_0003.vtk	21/02/2017 00:20	Arquivo VTK	8.855 KB
PartVtk_0004.vtk	21/02/2017 00:24	Arquivo VTK	8.855 KB

A geometria da simulação foi dada por um contorno rígido no modelo, que faz conotação ao equipamento demonstrado na Figura 8, onde se inicia com um reservatório que armazena as partículas de água demonstradas na Figura 21 na cor azul.

Posteriormente a continuidade do contorno segue a geométrica do canal que forma a figura de uma calha que contém as partículas de cor marrom definidas pelo solo, e por fim o coletor de partículas que armazena as partículas no final do curso. Reproduzindo o equipamento demonstrado na Figura 7.

### 3.2. Simulação computacional de ensaio laboratorial

Para calibrar o modelo serão utilizados os resultados do ensaio laboratorial apresentado por (ZUBELDIA et al., 2016). Os valores dos parâmetros introduzidos no código são apresentados no Quadro 1.

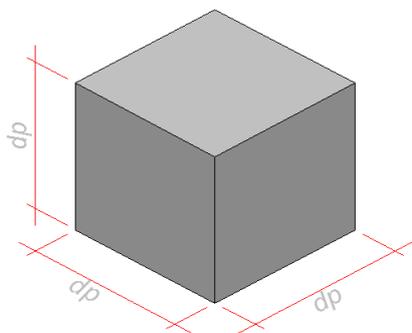
Foi utilizado o peso do material coletado por (ZUBELDIA et al., 2016) para ser comparado com os resultados do modelo. O modelo será calibrado para determinar a distância entre partículas que melhor reproduz o resultado experimental.

Quadro 1: Parâmetros do ensaio laboratorial

Parâmetro	Valor
$dp [m]$	0.0035
Ks/D50	1
$\rho_{solo} [kg / m^3]$	2.226
$\rho_{agua} [kg / m^3]$	1.000

A distância entre partículas ( $dp$ ) é a variável que define a quantidade de partículas ( $np$ ) que será utilizada na simulação. Para reprodução do experimento foram necessários dois tipos de partículas, uma para representar a água e outra para o solo. Pode-se comparar a partícula utilizada na simulação a um cubo, conforme a Figura 13, onde a distância de cada lado é o valor de  $dp$ .

Figura 13 - Demonstração partícula



O número de partículas é dado de acordo com a equação (6).

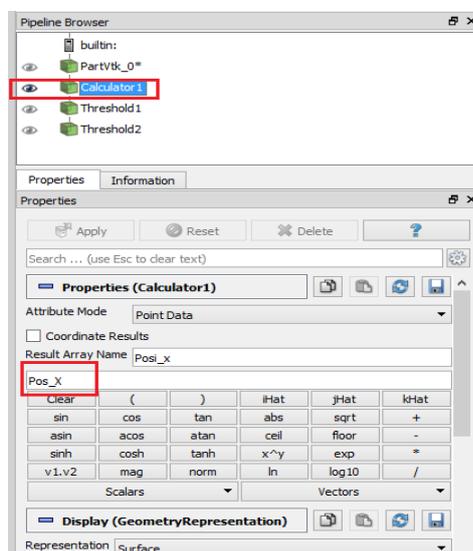
$$np = \frac{V_{material}}{dp^3} \quad (6)$$

Onde,  $np$  é o número de partículas,  $V_{material}$  é o volume do material em questão, podendo ser água ou solo e  $dp$  a distância entre partículas.

Todavia o pós-processamento foi realizado por intermédio do software *Paraview*, que possibilitou a aplicação de filtros, a qualquer instante de tempo dentro do resultado das simulações, demonstrando todos os resultados da simulação, ou seja, velocidade, posição. Este procedimento segue as seguintes etapas:

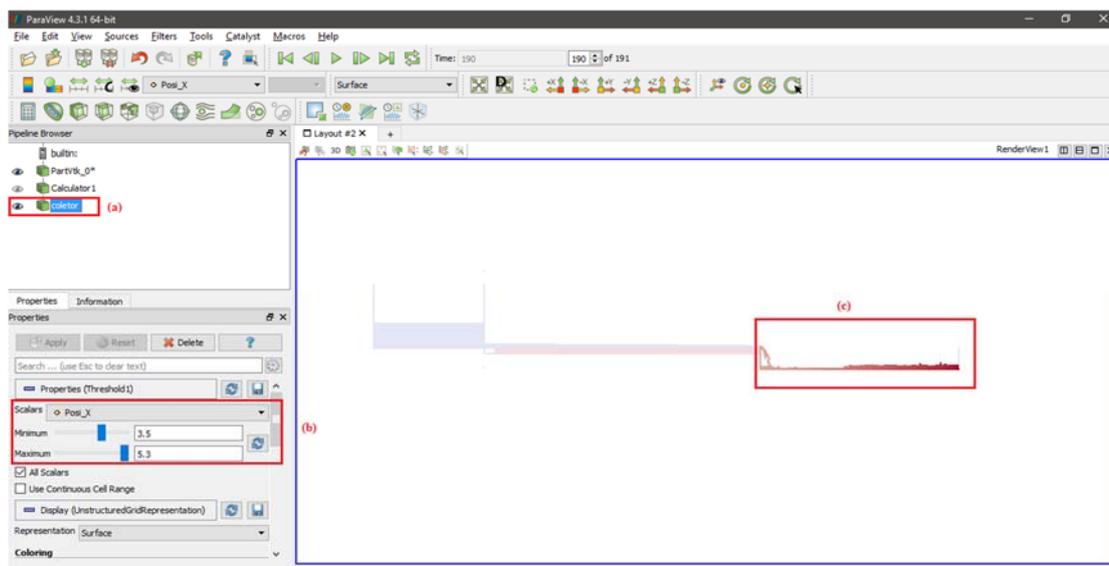
- a) Como a simulação foi realizada em 2D, a partícula se desloca em duas direções, resultando em um vetor de posição com o par ordenado (x,y), porem para quantificação do material transportado, é necessário restringir a visualização dentro da simulação para o coletor, que é possível após aplicar a função de calculadora do *software* que retorna um escalar de um vetor conforme Figura 14.

Figura 14 - Função calculadora *Paraview*.



O reservatório coletor fica entre os pontos 3,5 até 5,3m, para isto é necessário aplicar um filtro no escalar criado na etapa a, que é demonstrada Figura 15.

Figura 15 – Filtro para definir contorno do coletor.



As marcações em vermelho da Figura 15 são:

- (a) local de controle de aplicação do filtro, denominado de ‘coletor’;
- (b) configurações do filtro, onde se aplica no escalar criado anteriormente, o valor do intervalo 3.5 a 5.3m, deixando em evidencia apenas o reservatório coletor;
- (c) exibição gráfica do reservatório coletor que após a aplicação é demonstrado conforme Figura 16.

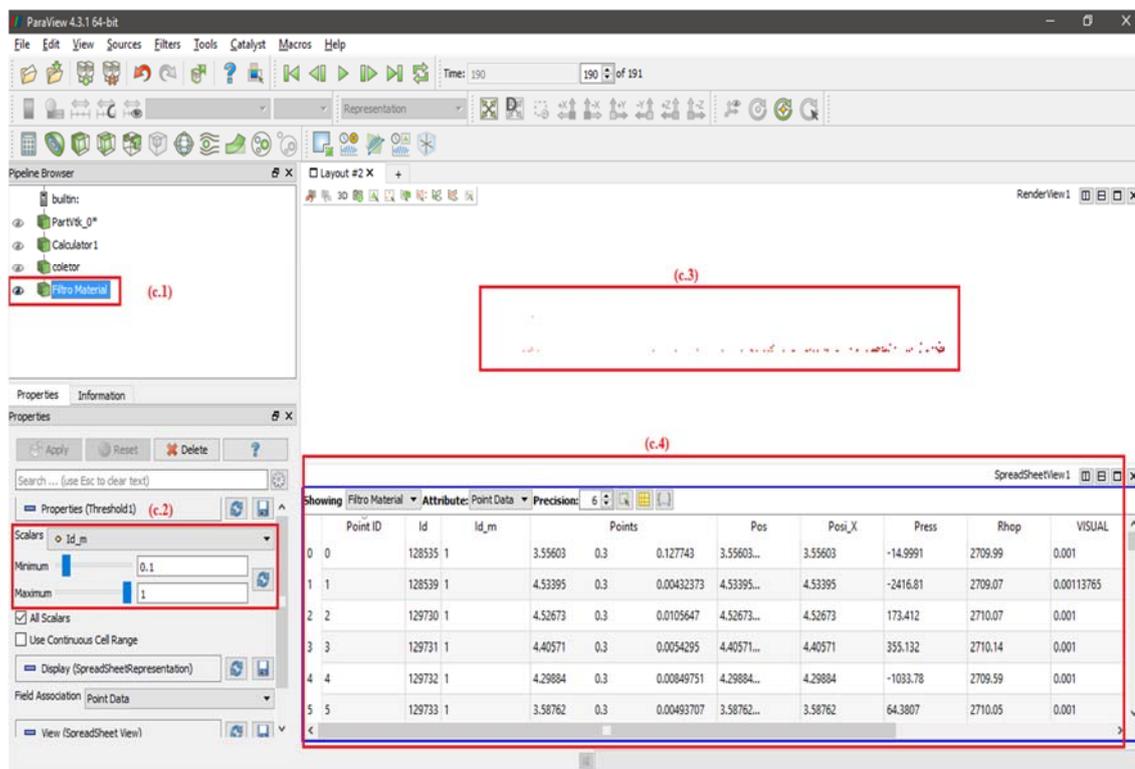
Figura 16 - Reservatório coletor.



A quantificação da massa para análise restringe apenas ao solo, que é representado pelas partículas em cor marrom. Para isto foi aplicado um filtro na característica do material, deixando em evidencia as partículas que representam o solo. O valor que de identificação do material é 0 para agua e 1 para solo.

O filtro aplicado (Figura 17) demonstra apenas os valores acima de 0.1, que são definidos para solo. Esta separação pode ser vista na Figura 17.

Figura 17 – Filtro para visualização de partículas no reservatório.



As marcações em vermelho da Figura 17 são:

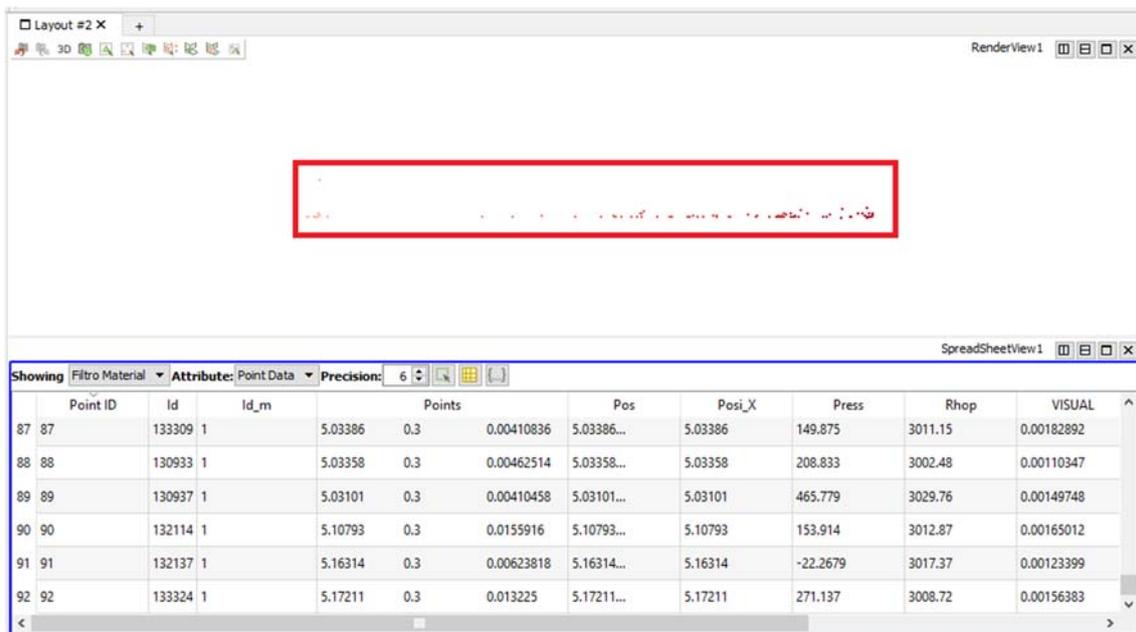
(c.1) local de controle de aplicação do filtro, denominado de 'Filtro material';

(c.2) configurações do filtro, onde se aplica o intervalo 0.1 a 1, na variável 'Id\_m' que identifica o material, forçando a exibição apenas do solo coletado pelo reservatório;

(c.3) exibição gráfica das partículas de solo no reservatório coletor conforme Figura 18.

(c.4) tabela de propriedades das partículas evidenciadas no filtro. Traz a quantidade de partículas com suas respectivas características, que será utilizada para levantamento da massa de sedimentos transportados.

Figura 18 - Partículas de solo no reservatório coletor.

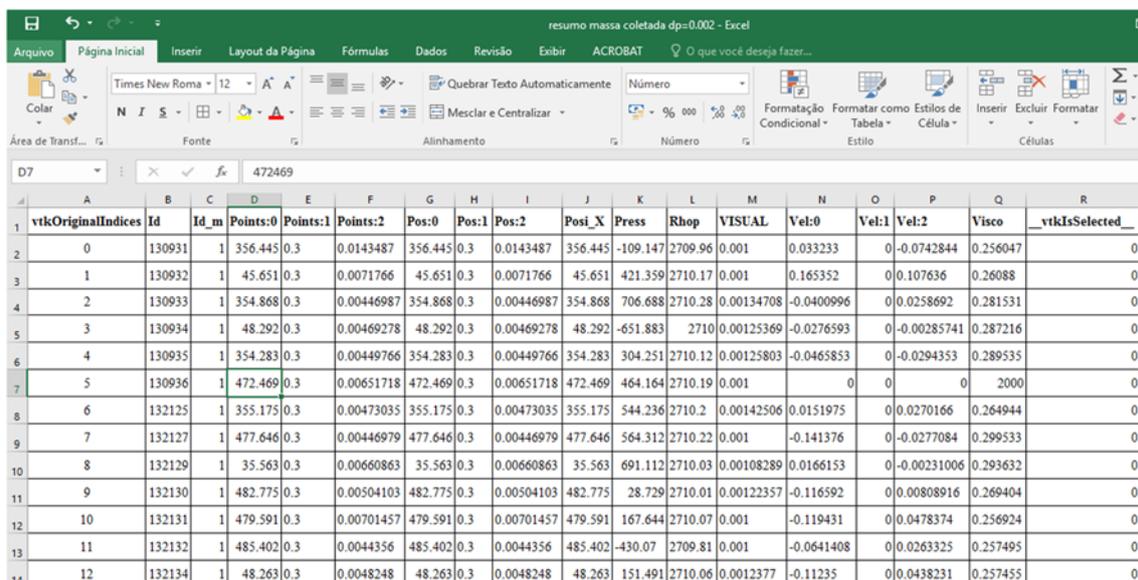


The screenshot shows a software interface with two main views. The top view is a 3D rendering of soil particles, with a red rectangular box highlighting a specific area. The bottom view is a spreadsheet titled 'SpreadSheetView1' showing a table of particle data.

Point ID	Id	Id_m	Points	Pos	Posi_X	Press	Rhop	VISUAL
87	133309	1	5.03386 0.3 0.00410836	5.03386...	5.03386	149.875	3011.15	0.00182892
88	130933	1	5.03358 0.3 0.00462514	5.03358...	5.03358	208.833	3002.48	0.00110347
89	130937	1	5.03101 0.3 0.00410458	5.03101...	5.03101	465.779	3029.76	0.00149748
90	132114	1	5.10793 0.3 0.0155916	5.10793...	5.10793	153.914	3012.87	0.00165012
91	132137	1	5.16314 0.3 0.00623818	5.16314...	5.16314	-22.2679	3017.37	0.00123399
92	133324	1	5.17211 0.3 0.013225	5.17211...	5.17211	271.137	3008.72	0.00156383

Para cada simulação foi realizado o procedimento acima que gera a tabela descrita em (c.4) que é exportada do software *Paraview* em formato de *csv* conforme demonstrado na Figura 19..

Figura 19 - Tabela exportação de dados



The screenshot shows an Excel spreadsheet with a table of data. The table has columns for various parameters including particle indices, IDs, positions, pressures, and viscosities.

vtkOriginalIndices	Id	Id_m	Points:0	Points:1	Points:2	Pos:0	Pos:1	Pos:2	Posi_X	Press	Rhop	VISUAL	Vel:0	Vel:1	Vel:2	Visco	_vtkIsSelected_
0	130931	1	356.445	0.3	0.0143487	356.445	0.3	0.0143487	356.445	-109.147	2709.96	0.001	0.033233	0	-0.0742844	0.256047	0
1	130932	1	45.651	0.3	0.0071766	45.651	0.3	0.0071766	45.651	421.359	2710.17	0.001	0.165352	0	0.107636	0.26088	0
2	130933	1	354.868	0.3	0.00446987	354.868	0.3	0.00446987	354.868	706.688	2710.28	0.00134708	-0.0400996	0	0.0258692	0.281531	0
3	130934	1	48.292	0.3	0.00469278	48.292	0.3	0.00469278	48.292	-651.883	2710	0.00125369	-0.0276593	0	-0.00285741	0.287216	0
4	130935	1	354.283	0.3	0.00449766	354.283	0.3	0.00449766	354.283	304.251	2710.12	0.00125803	-0.0465853	0	-0.0294353	0.289535	0
5	130936	1	472.469	0.3	0.00651718	472.469	0.3	0.00651718	472.469	464.164	2710.19	0.001	0	0	0	2000	0
6	132125	1	355.175	0.3	0.00473035	355.175	0.3	0.00473035	355.175	544.236	2710.2	0.00142506	0.0151975	0	0.0270166	0.264944	0
7	132127	1	477.646	0.3	0.00446979	477.646	0.3	0.00446979	477.646	564.312	2710.22	0.001	-0.141376	0	-0.0277084	0.299533	0
8	132129	1	35.563	0.3	0.00660863	35.563	0.3	0.00660863	35.563	691.112	2710.03	0.00108289	0.0166153	0	-0.00231006	0.293632	0
9	132130	1	482.775	0.3	0.00504103	482.775	0.3	0.00504103	482.775	28.729	2710.01	0.00122357	-0.116592	0	0.00808916	0.269404	0
10	132131	1	479.591	0.3	0.00701457	479.591	0.3	0.00701457	479.591	167.644	2710.07	0.001	-0.119431	0	0.0478374	0.256924	0
11	132132	1	485.402	0.3	0.0044356	485.402	0.3	0.0044356	485.402	-430.07	2709.81	0.001	-0.0641408	0	0.0263325	0.257495	0
12	132134	1	48.263	0.3	0.0048248	48.263	0.3	0.0048248	48.263	151.491	2710.06	0.0012377	-0.11235	0	0.0438231	0.257455	0

Com isso foi calculada para cada simulação a massa de material transportada a partir da contagem de partículas, definida na coluna *vtkOriginalIndices* da tabela demonstrada na Figura 19.

### 3.3. Análise paramétrica

Após as simulações e calibrações iniciais, foi realizada a variação dos parâmetros de entrada do modelo, para verificar a influência destes no volume de sedimento transportado e disposição final do leito da areia.

Os parâmetros do ensaio de laboratório realizado por (ZUBELDIA et al., 2016) descritos na Tabela 2 serão considerados como valores de referência discriminados na Tabela 6 como caso padrão.

Tabela 2 - Parâmetros para simulação e análise paramétrica.

Caso	Parâmetros constantes		Parâmetros alterados	
	$K_s / d_{50}$	$dp[m]$	$d_{50}[m]$	$\rho_s[kg / m^3]$
Padrão	✘	✘	0.0004	2.226
A	8.5	0.002	0.001	2.226
B	8.5	0.002	0.0001	2.226
C	8.5	0.002	0.004	1.800
D	8.5	0.002	0.004	2.800

Para cada caso listado na Tabela 2, foi realizado uma simulação alterando os parâmetros de entrada conforme descrito.

Na etapa de pós-processamento, foi utilizado para análise comparativa o valor da massa coletada no experimento realizado por (ZUBELDIA et al., 2016), a mesma utilizada para calibração dos parâmetros de entrada da simulação.

### **3.3.1. Alteração do diâmetro médio das partículas $d_{50}$**

Foram adotados para variação dos parâmetros  $D_{50}$  os valores limites, ou seja, o valor inicial e final do solo granular. Pois estes tipos de solo são utilizados para reprodução do experimento em canal de fluxo aberto, bem como os leitos de rios e barragens.

Os limites são expostos de acordo o intervalo demarcado entre os valores de 0,1mm a 1 mm, caracterizando conforme a Tabela 1 areia fina, encontrada na camada laminar do leito(CABRAL, 2005), que é carregada pelo fluxo contínuo.

Para esta análise são designados os casos A e B, descritos na Tabela 2, apenas os valores de  $d_{50}$  sofrem alteração. Foram realizadas duas simulações e para análise do resultado e quantificação de massa foi realizado a quantificação das partículas transportadas até o reservatório coletor.

O procedimento de simulação e análise dos dados segue conforme o item 3.2, que discorre as etapas de extração e processamento dos dados obtidos na simulação.

### **3.3.2. Alteração da densidade do sólido**

Representado pelos casos C e D descritos na Tabela 2, onde são variados os valores da densidade do solo, a fim de analisar a influência da densidade quanto ao transporte de sedimento, quando comparado com a simulação padrão.

O caso C demonstra uma situação de solo onde a densidade do solo saturada é próxima do valor da densidade da água. Este caso possibilitou a análise da efetividade do método, sendo que o mesmo deve ser transportado na camada turbulenta, tendo uma alta quantidade de solo transportado.

Já no caso D o valor da densidade se aproxima da brita 0, afim de demonstrar que dado o fluxo, este material é transportado por arraste conforme afirma Paiva (2001). Este transporte deve acontecer na camada superficial do leito com uma menor quantidade de material transportado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Simulação do ensaio experimental de (ZUBELDIA et al., 2016)

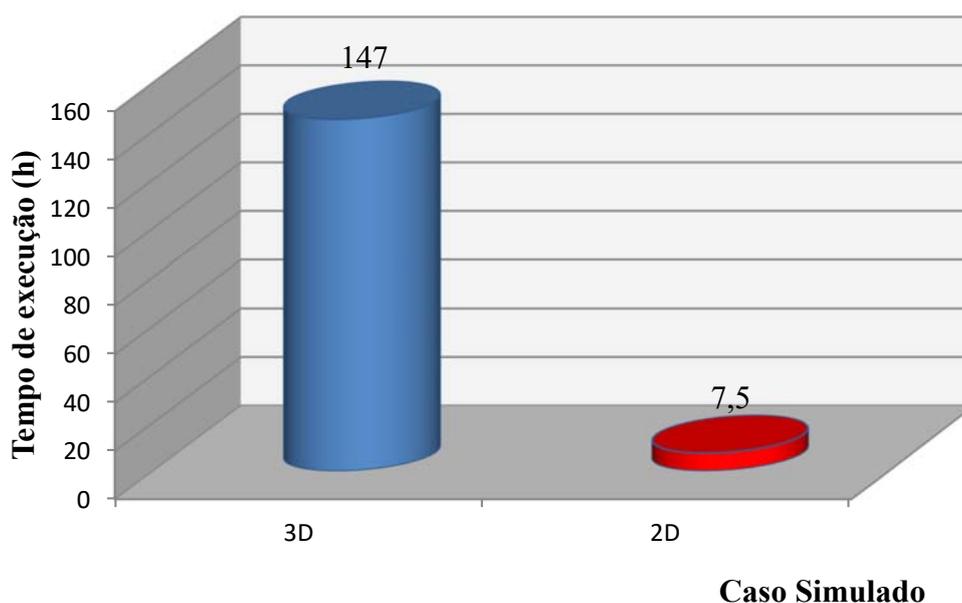
Foram simulados computacionalmente os ensaios laboratoriais de fluxo de canal aberto realizado por (ZUBELDIA et al., 2016), conforme descrito no item 3.2.

A simulação realizada consiste na reprodução do ensaio, no meio computacional e para isto foi necessário, em primeiro momento, restringir o espaço de trabalho para simulação em duas dimensões (2D). O cálculo e a reprodução dos dados foram no plano X e Y, dando a cada partícula, uma identificação única no espaço com o par ordenado, isto se aplica ao sólido, líquido ou contornos (forma geométrica do ensaio real).

Este método de cálculo em duas dimensões é amplamente utilizado nos ensaios de hidráulica de canais abertos, a fim de expressar os resultados de massa coletada por metro de largura do canal, facilitando a aplicação dos mesmos em canais.

A aplicação desta restrição de espaço na simulação computacional foi adotada, a fim de reduzir o tempo demandado em cada processamento. O aumento do tempo de execução do caso 3D em comparação ao caso 2D pode ser visto com maior clareza na Figura 20, que demonstra a discrepância entre o tempo de execução dos dois casos

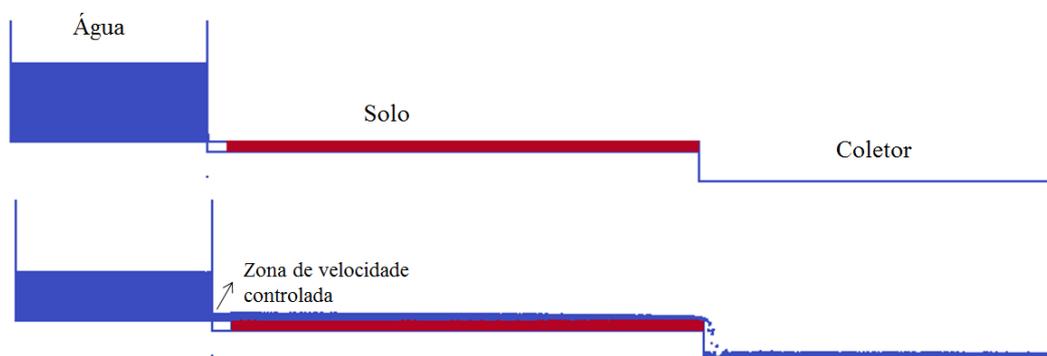
Figura 20 - Simulação x Tempo de Execução (h)



Dado o pouco tempo para realização da simulação e a grande demanda de repetição foi adotado o critério tempo de execução, visto que a simulação 2D atende os resultados para a análise delimitada neste trabalho.

Para que a simulação computacional do experimento seja o mais coerente com a realidade laboratorial algumas adaptações foram realizadas, sendo ela a velocidade da entrada da água no canal, a qual foi colocada no código como constante ( $u_x = 0,22$  m/s), conforme apresenta a Figura 21. Esse valor foi calculado a partir da altura média da lamina d'água entre os pontos definidos no ensaio laboratorial demonstrado por (ZUBELDIA et al., 2016) .

Figura 21 – Configuração caso 2D no *DualSphysics*.



Fonte: (ZUBELDIA et al., 2016)

#### 4.1.1. Simulação computacional

Os parâmetros para calibração inicial da malha de pontos foram utilizados conforme descrito no item 3.1.2.

Visto a demanda de tempo de processamento para cada simulação, conforme demonstrado no início do capítulo, é necessária à definição da malha de pontos, ou seja, a distância entre as partículas ( $dp$ ), que aproxime a convergência da simulação computacional ao experimento. Quanto maior o  $dp$  menor a quantidade de partículas da simulação.

As simulações foram iniciadas com a variação do  $dp$  de 0,2 cm a 1,6cm que gerou uma quantidade de partícula ( $np$ ) para cada caso, demonstrado na Tabela 3.

Com estes resultados foi possível aferir a Equação 6 analisando a influência da distância entre partículas que proporciona a convergência da malha.

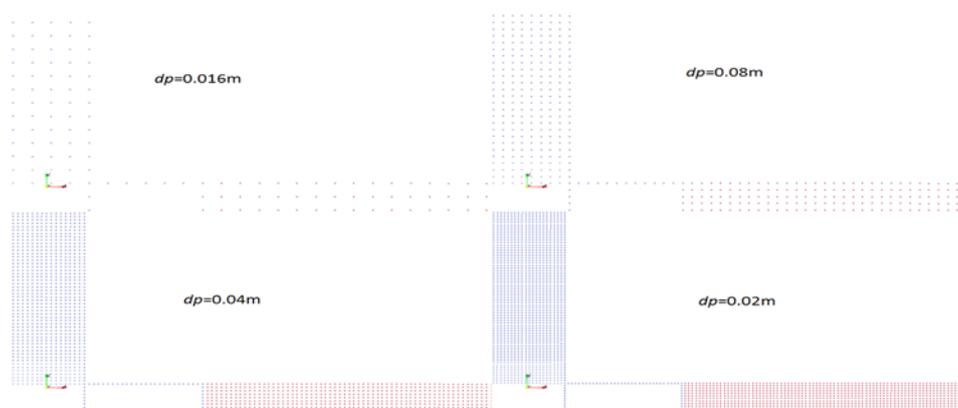
A densidade da malha que reproduz o experimento é definida pelo método citado no item 2.6, como reprodução do fenômeno real, ou seja, a disposição das partículas no contorno. Criando desta forma as condições necessárias para que se possa aplicar os cálculos, no campo vetorial de cada partícula do instante de  $t=0$  até o final, que com o deslocamento destorcem entre si uma malha de partículas conectadas.

Tabela 3 - Resoluções da malha de pontos testadas.

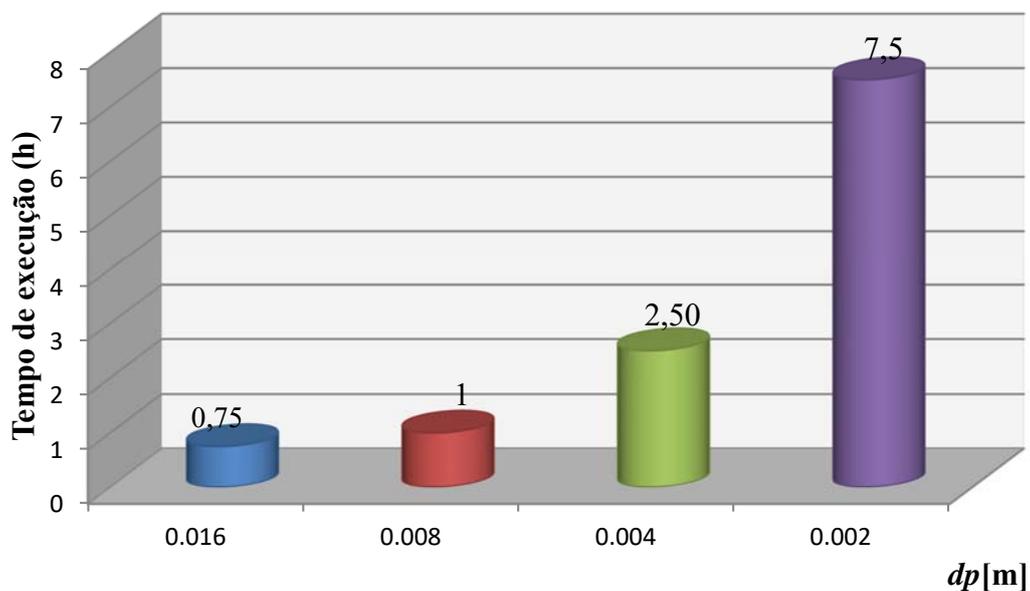
$dp$ [m]	Quantidade de partículas geradas ( $np$ )
0,016	2.455,00
0,008	8.884,00
0,004	33.870,00
0,003	60.114,00
0,002	133.337,00

Observa-se no resultado demonstrado acima que a proporção inversa entre  $dp$  e  $np$ , dobrando número de partícula a cada redução 0,1cm no  $dp$ .

Os conceitos abordados acima referentes a distância entre partículas versus a densidade da malha é vista conforme a Figura 22, que remete visualmente a quantidade de partículas para cada  $dp$ .

Figura 22 - Malha de pontos x  $dp$ 

Os resultados das simulações indicam que há uma tendência em que quanto menor  $dp$ , maior a possibilidade de reprodução fiel do experimento. Isto pode ser analisado conforme demonstra o gráfico da Figura 23, que demonstra o tempo demandado para cada simulação em decorrência da variação do valor  $dp$ .

Figura 23 - tempo de processamento entre  $dp$ .

Para atingir o resultado esperado foi necessário realizar diversas simulações onde se analisou a viabilidade técnica testando os limites do equipamento disponível.

#### 4.1.2. Definição da malha de pontos

A tomada de decisão para a definição da distância entre partículas a ser utilizada em todas as simulações foi o resultado da variação do  $dp$  conforme a Figura 23, em função de diferentes rugosidades equivalentes do grão  $k_s$  a fim de aferir a influência, quanto ao tempo despendido entre o início do ensaio até a instante em que a onda atinge a entrada do reservatório coletor.

Para isto foi aplicado à equação  $k_s = n * D_{50}$ , Onde,  $k_s$  é o coeficiente de rugosidade equivalente do grão,  $n$  é valor empírico da resultante entre  $D_{50}/k_s$  que compreende o valor de 1 a 10,  $D_{50}$  é o diâmetro médio das partículas.

Os valores para a definição da malha e aferimento da influência do  $k_s$  foi de acordo com as simulações geradas a partir dos dados relacionados n Tabela 4. Indicando assim quatro simulações para cada  $dp$ , resultando em 20 simulações para definição da malha de pontos.

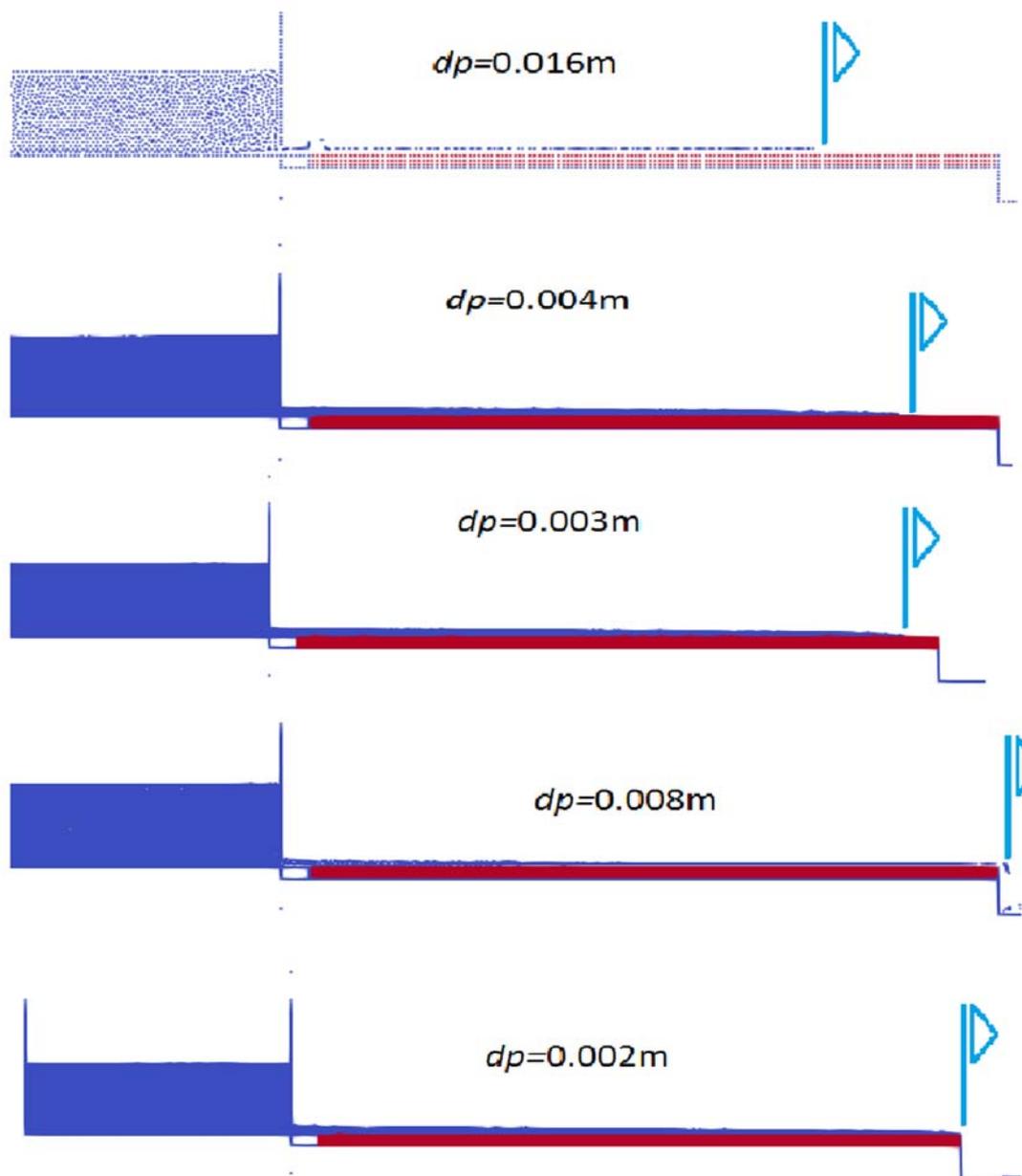
Tabela 4 - Variação do  $k_s$  x  $dp$ .

$dp$ [m]	$D_{50}$	$D_{50}/k_s$			
		1	5	7	10
0,016	0,004	0,004	0,02	0,028	0,04
0,008	0,004	0,004	0,02	0,028	0,04
0,004	0,004	0,004	0,02	0,028	0,04
0,003	0,004	0,004	0,02	0,028	0,04
0,002	0,004	0,004	0,02	0,028	0,04

Para todos os casos, foi considerado instante inicial como tempo=0s. O avanço da onda pode ser demonstrado na Figura 24, que traz a onda dentro do canal no instante de tempo=8,2s, este que foi anotado no experimento laboratorial oriundo da publicação (ZUBELDIA et al., 2016), bem como os demais dados para início das simulações conforme mencionado ainda o item 3.1.3.

Para melhor visualização na análise foi adicionado um objeto indicativo do posicionamento da onda no canal, bem como a disposição das simulações lado a lado a fim de fomentar a comparação entre as simulações, de acordo com Figura 24. Ainda como ressalva, que para cada simulação foi realizado esta análise a fim de verificar as influências.

Figura 24 - Definição da malha x avanço da onda a 8,2s.



Nesta análise, foi desconsiderado o resultado com  $dp=0.008m$  visto que o mesmo apresentou uma discrepância do resultado. Esta remoção não influenciou no resultado final, pois o mesmo apresenta discrepância quanto ao final do resultado, visto

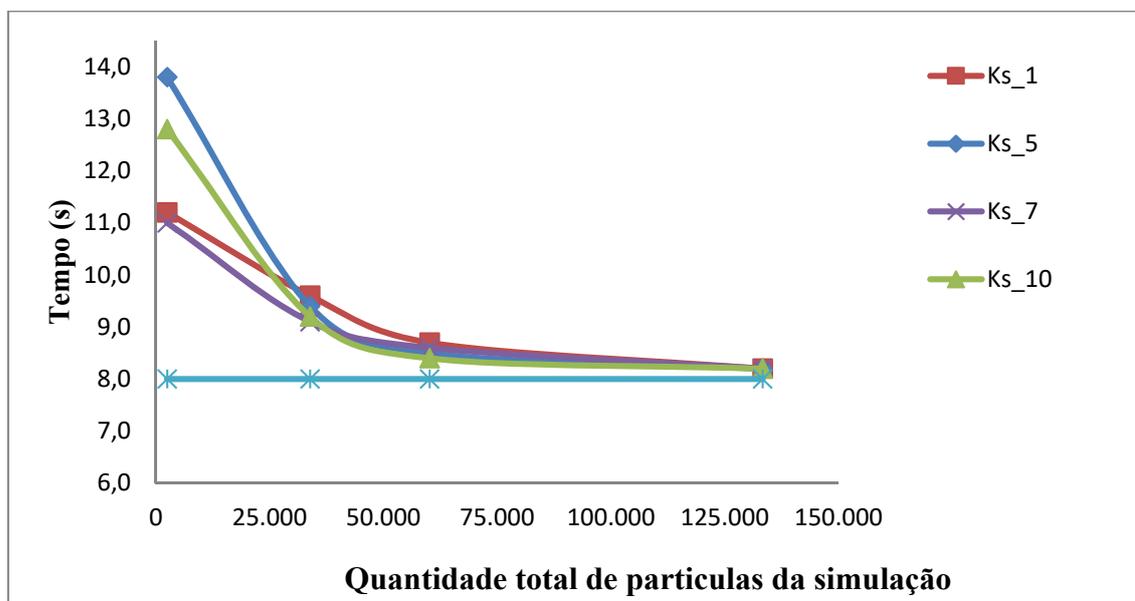
que atinge a chegada ao reservatório coletor com um tempo de 6,2 s, por isto descarta-se esta simulação.

Conforme análise visual das simulações, demonstrado na Figura 24, o resultado que mais se aproximou do experimento foi o  $dp = 0.002m$ , pois atende o requisito de avanço da onda no mesmo tempo do experimento laboratorial e é viável quanto ao poder computacional, faz-se a ressalva de que o tempo demandado nesta foi superior aos demais, chegando a total execução com 7 horas.

A análise numérica foi realizada de acordo com resultados do tempo gasto entre o início da simulação até o instante de tempo que a onda chega ao reservatório, este processo foi executado para cada simulação, conforme a ordenação da Tabela 4.

Os valores resultaram em um gráfico demonstrado na Figura 25, onde no eixo das abcissas são aplicados os valores de  $dp$  e no eixo das ordenadas o tempo gasto para cada simulação, onde foi explanada a alteração do  $k_s$  em decorrência do tempo de avanço da onda. Sendo assim cada ponto demonstrado no gráfico faz parte de um par ordenado ( $dp$  ; tempo(s)), onde o tempo é resultante da alteração do  $k_s$ .

Figura 25 - ( $dp$ ) x tempo de chegada ao coletor.



No gráfico demonstrado na Figura 25, algumas observações são relacionadas abaixo:

O pico demonstrado na curva  $k_s = 1$ , curva em vermelhos identificada com símbolos quadrados, visto que o mesmo não demonstra a realidade do experimento conforme abordado na análise visual.

- a) A convergência entre as curvas quanto à reta do experimento, dá-se com maior quantidade de partículas;

A curva que se aproxima à reta do experimento laboratorial, que na Figura 25 é demonstrada pela reta com asteriscos, é o  $dp = 0.0002m$ , confirmando assim a análise realizada na Figura 24.

Verifica-se ainda que no tocante ao parâmetro variado para definição da malha,  $k_s$ , não tem relevância determinante, pois os resultados demonstrados com  $dp = 0.0002m$ , não houve variação expressiva, unificando assim a convergência com este  $dp$ .

Esta definição da malha ocasionou resultado perante o objetivo traçado no item 3.1, definindo para o experimento analisado, o  $dp$  além de ser fixo, converge com maior brevidade aos resultados reais, poupando o desperdício de tempo em se buscar esta análise relevante entre a densidade da malha com as demais variáveis, sanando também que de no tocante a esta análise o parâmetro  $k_s$ , empírico de acordo com o modelo adotado para análise não interfere diretamente.

Dado as observações acima, para efeito de análise da variação dos demais parâmetros, será utilizado  $dp = 0.0002m$ .

## 4.2. Análise quantitativa de material transportado

Para efeito de análise no que tange ao transporte de sedimento, ou seja, as quantidades de partículas solidam coletadas após 18s de simulação, é necessário algumas adequações, inicialmente no tocante a definição da massa de uma partícula, tendo como embasamento a Figura 13, que demonstra graficamente uma partícula, obtemos a sua massa de acordo com a seguinte equação:

$$m_e = dp \cdot dp \cdot \rho_s \cdot Np \quad (7)$$

Onde  $m_e$  é a massa total das partículas coletadas partícula,  $\rho_s$  é a densidade do sedimento e  $Np$  a quantidade de partículas de sedimento coletado. Logo para que se possa determinar a massa da partícula, basta aplicar o valor da densidade na equação acima.

Nesta simulação foram adotados dois tipos de partículas sendo elas, água e solo. Para efeito de comparação com o ensaio, somente foi necessária a contagem de matéria transportado, ou seja, solo, que conforme (ZUBELDIA et al., 2016) a densidade é  $\rho_s = 2.710,00 \text{ kg} / \text{m}^3$  do sedimento seco e  $\rho_s = 2.226,00 \text{ kg} / \text{m}^3$  saturado, este último será utilizado para obtenção da massa da partícula total.

Os resultados obtidos estão demonstrados conforme Tabela 5, onde foi adicionado o  $L_{canal}$ , sendo a largura do canal do experimento. Este se faz necessário, pois o resultado do experimento é dado em  $kg$ .

Tabela 5 - Resultado massa coletada

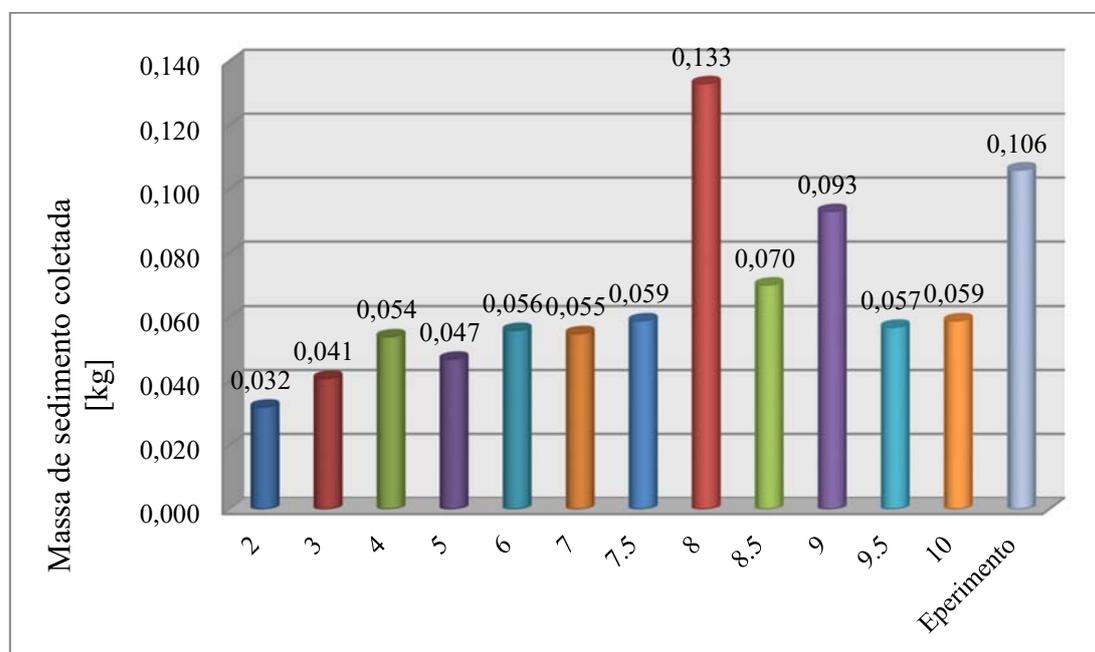
$K_s / d_{50}$	$D_{50} [m]$	$\rho_s [kg / m^3]$	$Np$	$L_{Canal} [m]$	$m_e [kg]$
2	0,002	2226	42	0,086	0,032
3	0,002	2226	53	0,086	0,041
4	0,002	2226	70	0,086	0,054
5	0,002	2226	62	0,086	0,047
6	0,002	2226	73	0,086	0,056
7	0,002	2226	72	0,086	0,055
7.5	0,002	2226	77	0,086	0,059

8	0,002	2226	174	0,086	0,133
8.5	0,002	2226	92	0,086	0,070
9	0,002	2226	121	0,086	0,093
9.5	0,002	2226	74	0,086	0,057
10	0,002	2226	77	0,086	0,059
Experimento	-	-	-	-	0,106

Observa-se que a massa de material transportado sofre um crescente aumento com o aumento do parâmetro  $k_s$  até  $k_s/d_{50}=7$ , logo após, há um pico de variação entre  $k_s/d_{50}=8$  e  $k_s/d_{50}=9$  que foge do padrão numérico, sendo classificado com valor a ser desprezado para comparação com o experimento.

Conforme demonstra a Figura 26, existe um aumento contínuo na massa coletada de acordo com o crescimento da relação  $k_s/d_{50}$ , reproduzindo o fenômeno de estabilização do transporte de sedimento na camada de regime turbulento do fluxo.

Figura 26 - Massa de material para  $t=18s$ .



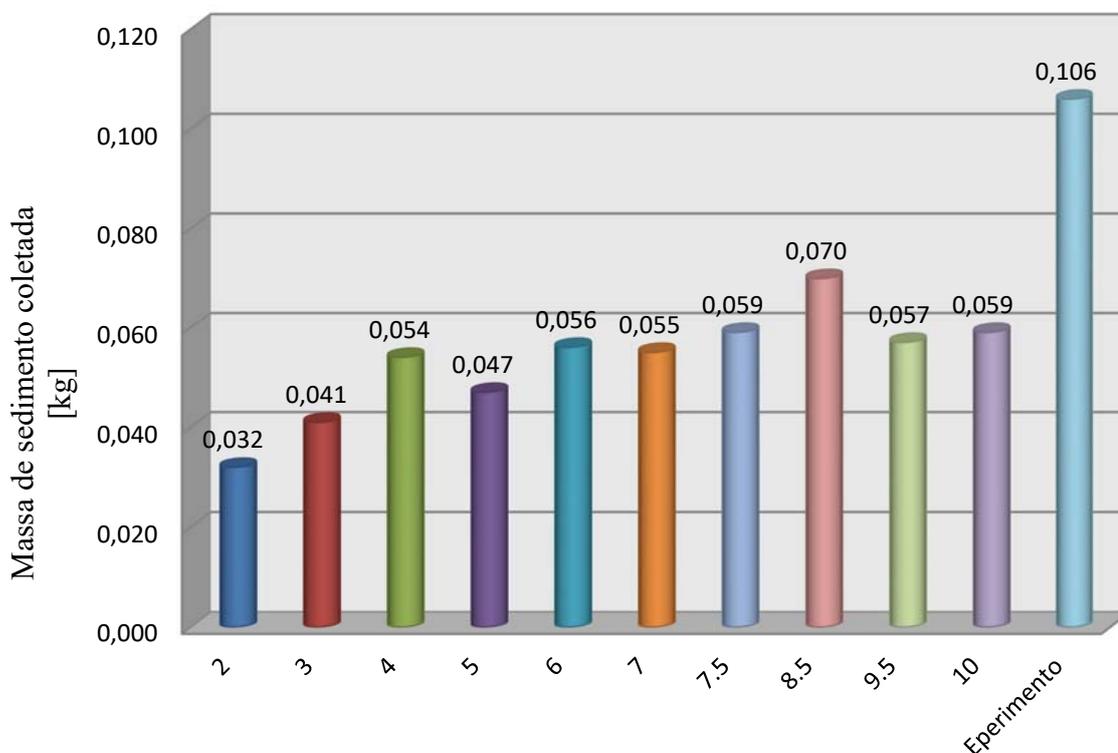
A simulação se aproxima com maior precisão ao resultado experimental, indicando um comportamento do fluxo hidráulico onde os grãos encontram-se na camada turbulenta.

Considerando apenas os valores compreendidos como resultados válidos para o modelo numérico, onde são descartados os valores discrepantes da média, que são eles  $k_s/d_{50} = 8.0$  e  $9.0$  que pode ser visto na Figura 26.

Quanto aos resultados descartados, foram avaliados os arquivos de saída de forma isolados, onde houve alguns problemas durante a execução referente a estouro de partícula, que acontece devido a alguns contornos computacionais isolados. Essas simulações foram realizadas novamente e demonstraram o mesmo comportamento, levando a conclusão de que é um problema referente ao código com os contornos e geometria.

A relação  $k_s/d_{50}$  que melhor se aproximou ao valor da massa coletada na simulação ao experimento foi  $k_s/d_{50} = 8.5$ , que manteve uma variação em torno de 33% a menos que o real. Este valor é aceito como referência, pois é o resultado que melhor expressa a abordagem numérica para representação do experimento. A Figura 27 traz o gráfico de massa coletada no instante  $t=18s$ , com os valores validos.

Figura 27 - Massa de material para  $t=18s$  relações válidas.



### 4.3. Análise de influência de variação paramétrica

Após definição dos parâmetros de entrada para simulação do experimento realizado por (ZUBELDIA et al., 2016) no código *DualSphysics* que melhor atende o método *SPH*, conforme os parâmetros definidos no item 4.1 e 4.2 denominado de caso padrão demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros validos para simulação

Parâmetro	Valor
$dp[m]$	0.0002
$k_s/d_{50}$	8.5
$D_{50}[m]$	0.0004
$\rho_s[kg / m^3]$	2.226,00

Foram realizadas outras simulações a fim de aferir a influência das características ligadas diretamente ao solo que são elas densidade do solo ( $\rho_s[kg / m^3]$ ) e diâmetro médio das partículas  $D_{50}$ .

#### 4.3.1. Variação do diâmetro médio das partículas

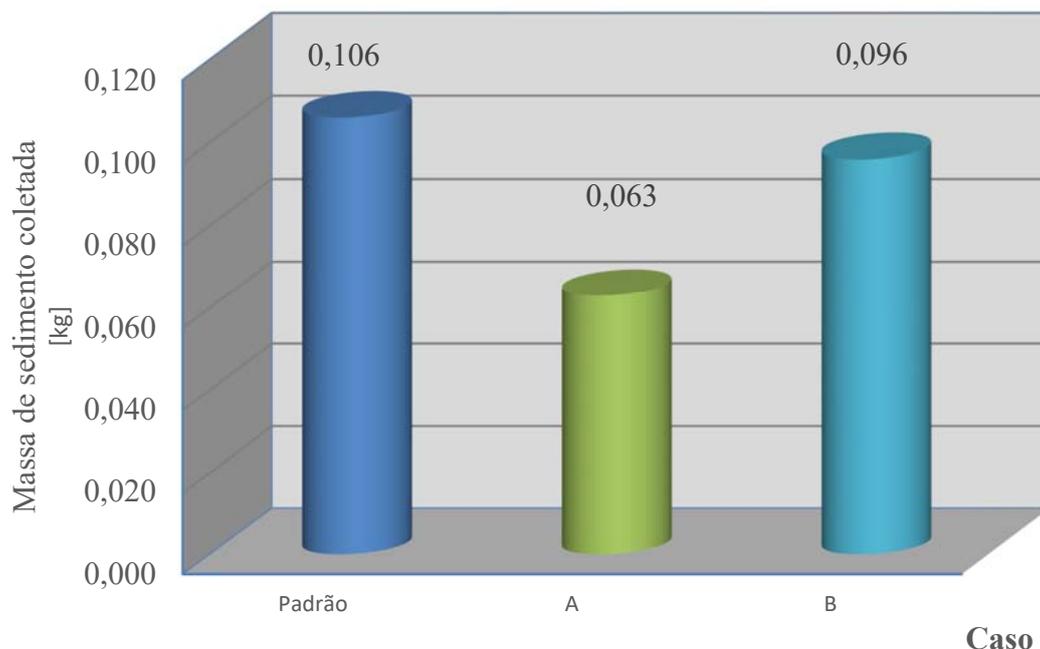
As simulações realizadas para aferimento da influência das variáveis de entrada seguiu conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Simulação para análise de influência  $d50$ .

Caso	$d_{50}[m]$	$\rho_s[kg / m^3]$	$NP$	$L_{Canal}[m]$	$m_e[kg]$
Padrão	0.0004	2226	-	0,086	0,106
A	0.001	2226	82	0,086	0,063
B	0.0001	2226	125	0,086	0,096

O resultado dessa simulação pode ser observado conforme o gráfico da Figura 28. Nesta simulação foi possível observar que quanto maior o valor de  $D_{50}$ , ou seja, quanto maior o grão de sedimento do leito, menor a massa coletada.

Figura 28 - Massa coletada com a variação do diâmetro médio das partículas.



Quando comparado à massa coletada no  $t=18s$  obtidos nas simulações, com o experimento, observa-se que a simulação cujo diâmetro no limite inferior dado por  $D_{50}=0.0001m$ , aproxima do valor coletado no experimento. Isso pode ser explicado, pois o material utilizado no experimento é uma areia fina com  $D_{50}=0.0035m$ , logo o resultado atendeu a expectativa.

Já com a variação no limite superior simulado que representa a classe de areia fina, com valor de  $D_{50}=0.001m$  foi observado à redução da quantidade de material transportado até o reservatório coletor.

Nesta análise de influência do parâmetro  $D_{50}$ , foi possível observar que a simulação atende a expectativa do experimento ensaiado, bem como a realidade de campo. Pois conforme demonstrado na Figura 28 quanto menor o diâmetro médio da partícula do sedimento aplicado em a um fluxo unidirecional maior será o taxa de transporte do sedimento.

### 4.3.2. Variação da densidade do solo

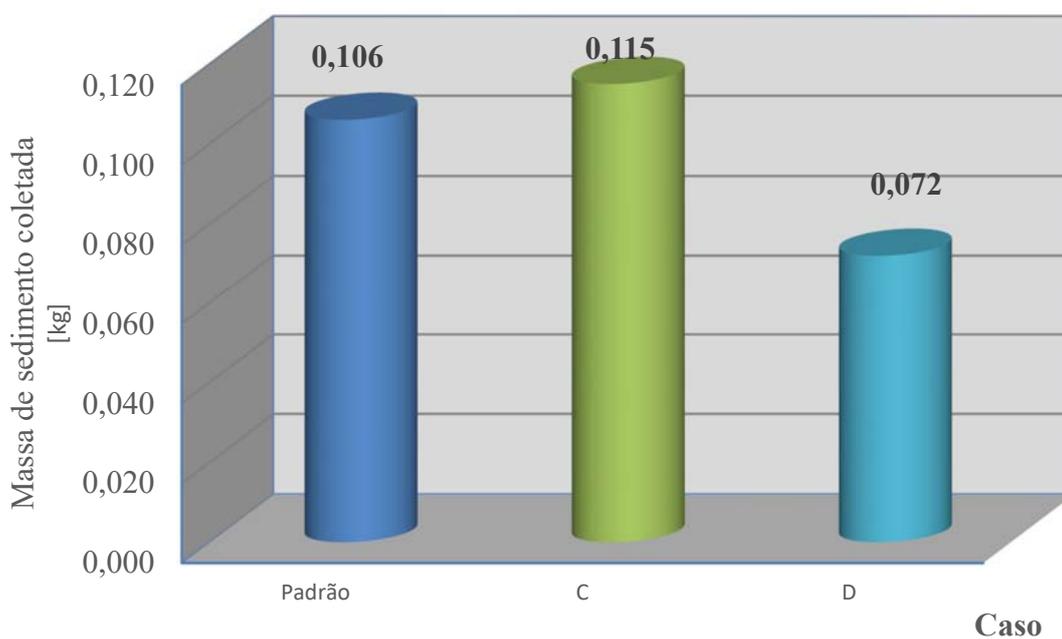
As simulações realizadas para aferimento da influência das variáveis de entrada seguiu conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Simulação para análise de influência da densidade do solo

Caso	$d_{50}[\text{m}]$	$\rho_s[\text{kg} / \text{m}^3]$	$NP$	$L_{Canal}[\text{m}]$	$m_e[\text{kg}]$
Padrão	0.0004	2226	-	0,086	0,106
C	0.0004	1800	82	0,086	0,115
D	0.0004	2226	125	0,086	0,072

O resultado dessa simulação pode ser observado conforme o gráfico da Figura 29. Nesta simulação foi possível observar que quanto maior o valor de  $D_{50}$ , ou seja, quanto maior o grão de sedimento do leito, menor a massa coletada.

Figura 29 - Massa coletada com a variação da densidade do solo.



Conforme expressado no gráfico da Figura 29 o caso C com menor densidade demonstra a realidade, onde se pode inferir que o método no que tange a densidade de fato atende as expectativas.

Por ter menor densidade o Caso C é mais leve e geralmente é transportado por suspensão ou dissolvida conforme define Paiva(2001), logo por estar na camada turbulenta do leito tem menor resistência ao transporte.

Já no caso D demonstra que ao se tratar de um material com maior peso, porém diâmetro médio menor apresenta uma maior resistência ao transporte dos seus sedimentos que pode ser dado por saltação ou por arraste. Comprovando a efetividade do método, pois o fenômeno do transporte de sedimentos demanda maior energia do fluxo para romper a barreira da coesão.

## 5. CONCLUSÃO

Visto o crescente aumento em obras geotécnicas, destinadas em sua grande maioria para resolver ou mitigar os problemas antropológicos causados pelas intervenções realizadas em cursos de rios que acarreta em sua grande maioria problemas relacionados a erosões.

O problema da erosão tem sido tratado por ensaios laboratoriais e modelos empíricos de menor eficácia e alto custo, que visam estimar o transporte de sedimento por condições uniforme não demonstrando a realidade necessária. Para isto, os modelos numéricos trazem a possibilidade de simular computacionalmente diversas condições de ambientes e intervenções, fornecendo resultados dinâmicos a cerca dos problemas à um baixo custo financeiro.

O método Smoothed Particles Hydrodynamics (SPH) utilizado neste trabalho fornece uma ferramenta numérica apropriada para isto, pois é um método sem malha e Lagrangeano, que permite lidar naturalmente com os problemas de carregamento e arraste de partículas. O código DualSphasic foi utilizado para simular o experimento laboratorial realizado, afim de constatar a efetividade do método tomando com referência os valores utilizados dos materiais. A densidade da malha foi dada por uma distância de 0.0002 m entre partículas, vale ressaltar que quanto menor este valor melhor o resultado final, porém eleva-se o tempo de processamento, dado o poder computacional utilizado.

O estudo da influência da rugosidade equivalente do grão permitiu entender a influência deste parâmetro empírico na quantidade de material erodido. O aumento da rugosidade equivalente do grão gerou maiores valores de massa erodida. No entanto, acima de um determinado valor, o parâmetro deixa de influenciar a resposta. Alguns casos devem ser analisados individualmente, visto que os resultados obtidos na simulação com  $k_s = 8$  e  $9$ , foram descartados por não representar o experimento.

Os parâmetros dos materiais quando variados, se comportam conforme os experimentos, elevando a taxa de material erodido de quando há um menor diâmetro médio e densidade. Quando analisado a densidade simulada com o valor do diâmetro

médio das partículas do experimento, infere-se que o método corresponde às expectativas do experimento laboratorial.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6502/1995. Rochas e solos.** Rio de Janeiro, 1995.

BACELLAR, L. A. P. (2000). **Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG.** Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 240 p.

BARTH, F. T. et al. **Modelo para gerenciamento de recursos hídricos.** São Paulo: Nobel, Coleção ABRH, v.1, 1987.

BASTOS, C. A. B. (1999). **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados.** Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999. 303 p.

BROWN, J. Waves, Tides and Shallow-Water Processes. Chapter 4. Principles and processes of sediment transport. Open University, 1999.

CABRAL, J. B. P. Estudo do processo de assoreamento em reservatórios 1. **Caminhos de Geografia**, v. 6, n. 1, p. 62–69, 2005.

CAMAPUM, J.C., SALES, M., SOUZA, N. & MELO, M. (2006). **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro.** FINATEC, Brasília, 464 p., 2006.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Volume 1: fundamentos. 6ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática.** 1 ed. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.

CARVALHO, N. O; FILIZOLA Jr., SANTOS, P. M. C; LIMA, J. E. F. W. - **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios Brasília**: ANEEL, 185p. 2000.

Crespo, A.J.C., Domínguez, J.M., Rogers, B.D., Gómez-Gesteira, M., Longshaw, S., Canelas, R., Vacondio, R., Barreiro, A. & García-Feal, O. (2015). **Dualsphysics: open-source parallel cfd solver based on smoothed particle hydrodynamics (sph)**. *Comput. Phys. Commun.*, 187: 204–216.

DAS, BRAJA M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 560 p.

Du Boys, D. (1879). **Le rhone et les rivieres a lit affouable**. *Annales des Ponts et Chaussées*, 54p.

FOURTAKAS, G. (2014). **Modelling multi-phase flows in Nuclear Decommissioning using SPH**. University of Manchester, Manchester, U.K.

FOURTAKAS, G., ROGERS, B.D. & LAURENCE, D. (2014). **3-d sph modelling of sediment scouring induced by rapid flows**. *Proceedings of the 9th SPHERIC International Workshop*, 9–16

Gingold, R.A. & Monaghan, J.J. (1977). **Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars**. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 181: 375–389

GYR, A. & HOYER, K. (2006). **Sediment transport. A geophysical phenomenon**. Springer, Dordrecht, Holanda, 283 p., 2006.

Hu, X.Y. & Adams, N. a. (2007). **An incompressible multi-phase sph method**. *J. Comput. Phys.*, 227(1): 264–278.

JESUS, A.S. (2013). **Investigação Multidisciplinar de Processos Erosivos Lineares: Estudo de Caso da Cidade de Anápolis - GO**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD - 087/2013, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 340 p.

LIMA, M.C. **Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas**. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT,UnB, Brasília, DF. 2003.

Liu, G.R. & Liu, M.B. (2003). **Smoothed Particle Hydrodynamics: a mesh free particle method**. World Scientific Publishing Co., Singapur.

Liu, M.B. & Liu, G.R. (2010). **Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments**. Arch. Comput. Methods Eng., 17.

Lucy, L.B. (1977). **Numerical approach to testing the fission hypothesis**. Astron. J., 82: 1013–1024

MACEDO, wanderson da silva, 2016. **Avaliação experimental de transporte de sedimentos em materiais granulares**. Projeto de pesquisa de conclusão de curso – ulbra – centro universitário luterano de palmas.

Manenti, S., Sibilla, S., Gallati, M., Agate, G. & Guandalini, R. (2012). **Sph simulation of sediment flushing induced by a rapid water flow**. J. Hydraul. Eng., 138(3): 272–284.

MENDES, C. A. R. (2006). **Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim – RJ**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro. 236 p.

PAIVA, J. B. D. **Avaliação dos Modelos Matemáticos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios**. 1988. 315 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

PAIVA, J. B. D. **Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios**. In: PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. de (Org.). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001. v. 1, p. 313-364.

PORTUGUÊS, C. L. P. C. **Programação de Modelos de Transporte Sedimentar Comparação de Soluções**. 2008. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro/Portugal, 2008.

RAMOS, C.L. **Critérios indicativos para a caracterização da potencialidade do assoreamento em reservatórios urbanos.** Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, Minas Gerais, 1999.

SHIELDS, A. (1936). **Aplicação dos princípios de similaridade e turbulência ao movimento por arraste de partículas.** 26p. (em alemão).

SOUSA, J. M. **Desafios da Medição Experimental da Descarga de Fundo no Estuário do Timbó Construção e Testes de um Amostrador.** 2011. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2.ed. Porto Alegre. Ed. UFRGS, ABRH, 2001. 943 p.

VAN RIJIN, L. C. **Manual sediment transport measurements,** 2005, 500p.

VAN RIJIN, L.C. (1993). **Principles of sediment transport in rivers, estuaries, and coastal seas.** Aqua Publications, Blokzijl, The Netherlands.

VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509 p.

Versteeg, H. & Malalasekera, W. (2007). **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method.** Prentice Hall

VILLELA, S.M; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill. 1975.

ZIENKIEWICZ, O.. (1977). **The finite element method.** London : McGraw-Hill, Londres.

ZUBELDIA, E. H. et al. Modelling sediment erosion in fluvial channels using SPH. **Proceedings of the 11th International SPHERIC Workshop,** p. 345–352, 2016.