

**ROBERTA DE ALMEIDA COSTA CAMPEÃO**

**MÔNICA DE AQUINO GALEANO MASSERA DA HORA**

# **SEDIM 2.0**

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO DO  
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

1ª Edição

Niterói  
2018

## PREFÁCIO

O Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biossistemas da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense foi criado em 2012 e tem por objetivo principal qualificar o corpo discente no campo dos recursos naturais, condizentes com os ideais de sustentabilidade ambiental. Uma das linhas de pesquisa do curso é Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

Os recursos hídricos, mais especificamente os superficiais, demandam o conhecimento dos mecanismos do escoamento em rios, dentre os quais se destacam os processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos. Esses processos têm efeitos no meio ambiente e na sociedade e a mitigação dos seus efeitos adversos exige o estudo das causas, que, por sua vez, demanda a quantificação dos sedimentos transportados, representada pela descarga sólida total. Tendo em vista a complexidade das fórmulas matemáticas envolvidas na estimativa dessa variável, é essencial a automatização dos cálculos por meio de ferramenta computacional, concedendo segurança nos resultados e economia de tempo aos pesquisadores e profissionais envolvidos na temática.

É com grande satisfação que apresento este livro que consolida a pesquisa desenvolvida na concepção e estruturação do SEDIM 2.0 e espero que os leitores desfrutem da obra.

*Carlos Rodrigues Pereira*  
Coordenador do Mestrado em Engenharia de Biossistemas  
Universidade Federal Fluminense

## APRESENTAÇÃO

Este livro, fruto de uma dissertação defendida em 2017 no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biosistemas da Universidade Federal Fluminense, discorre sobre a atualização da ferramenta computacional SEDIM 1.0, desenvolvido em 1996, que apesar de ter sido amplamente utilizado durante anos, foi criado para computadores de 32 bits, existindo, atualmente, problemas de compatibilidade para computadores de 64 bits. Dessa forma, devido ao avanço tecnológico e a importância do conhecimento sobre a produção de sedimentos nas bacias hidrográficas e sua interferência no abastecimento, agricultura, geração de energia hidrelétrica, navegação, dentre outras, se fez necessária, a sua atualização para a versão SEDIM 2.0. A primeira versão foi estruturada na linguagem *QBASIC*, enquanto a segunda foi desenvolvida em *Python*, preparada para operar em *Windows* 64 e 32 bits. Devido à linguagem de programação utilizada, o SEDIM 2.0 é livre e permite atualizações, bem como a integração com outros programas já existentes.

Por fim, as autoras manifestam aqui o seu agradecimento pelo apoio financeiro da Capes – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior no desenvolvimento deste trabalho, através da concessão de bolsa de pesquisa.

*Roberta de Almeida Costa Campeão*

*Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora*

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	1
LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON .....	3
FÓRMULAS CLÁSSICAS DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	5
DETERMINAÇÃO DE OUTROS PARÂMETROS .....	19
APLICABILIDADE DO SOFTWARE.....	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	23
APÊNDICE A.....	25
APÊNDICE B.....	26
APÊNDICE C .....	36

## INTRODUÇÃO

O aumento acelerado do uso do solo e do aproveitamento dos recursos hídricos somados à falta de planejamento urbano e rural teve como consequência a ocupação irregular do solo, a redução de matas ciliares, práticas agropecuárias inadequadas, entre outros. Isso tudo acarretou o aumento das erosões nas terras, do transporte sólido nos rios e depósitos dos sedimentos nos canais fluviais e reservatórios, portos fluviais e marítimos e na foz dos cursos d'água (CARVALHO, 2008).

No que diz respeito às bacias hidrográficas, o desmatamento, que tem que como uma das consequências a erosão acelerada, é um dos principais fatores do desequilíbrio hidráulico-sedimentológico. A erosão e o desmatamento trazem como consequências a diminuição do tempo de acumulação das águas nas bacias, provocando picos de cheias e também alterações ecológicas (HORA, 1996). Podem também reduzir a vida útil de reservatórios, prejudicar a prática de navegação, elevar os custos do tratamento de água, entre outros (BELING *et al.*, 2007).

Sendo assim, os sedimentos como produtos da interação atmosfera-pedósfera passam a ser não só um indicador natural de qualidade ambiental, mas também da pressão do homem no ambiente (POLETO, 2008). Nesse contexto, o estudo hidráulico-sedimentológico é de grande importância nas obras de engenharia, inerentes ao desenvolvimento das áreas urbanas e rurais. Vale ressaltar que os custos para desassorear o leito de um rio, lago ou reservatório são elevados (BELING *et al.*, 2007). Além disso, é particularmente importante para o Brasil em razão dos sistemas elétricos do país serem predominantemente hidráulicos (CARVALHO *et al.*, 2000).

As primeiras tentativas de modelar o fenômeno de transporte de sedimentos datam do século XIX, com a chamada Lei de Stokes que determinou a velocidade terminal de sedimentação (POLETO, 2008). Já no século XX, foram desenvolvidas formulações que consideram o transporte de sólidos nos rios, entre elas estão, por exemplo, os modelos de Einstein (1950) e Yang (1973). A carga sólida se refere ao fenômeno qualitativo do movimento, podendo ser em suspensão, de arrasto, em contato e saltante (CARVALHO e HORA, 2014).

Hora, em 1996, desenvolveu o programa SEDIM 1.0, que realiza o cálculo, através de diversas formulações, da carga sólida que se transporta essencialmente por arraste e da carga sólida que se transporta por arraste e suspensão. SEDIM 1.0 foi criado para computadores de 32 bits, existindo, atualmente, problemas de compatibilidade em computadores de 64 bits.

Dessa forma, devido ao avanço tecnológico, se fez necessária a atualização do programa para a versão SEDIM 2.0. A primeira versão foi estruturada na linguagem *QBASIC*, enquanto a segunda foi desenvolvida em *Python*, que por ser portátil, permite a sua execução em diferentes tipos de computadores com pouca ou nenhuma modificação (DOWNEY, 2012).

## LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON

A linguagem de programação *Python* é de altíssimo nível (VHLL – *Very High Level Language*). Foi criada na década de 90 por Guido van Rossum no Instituto Nacional de Pesquisa para Matemática e Ciência da Computação da Holanda (CWI). A linguagem é gratuita, de código aberto e possui disponibilidade para *Windows*, *Linux*, *Mac*, *Palm*, celulares e outras infinidades de sistemas (LABAKI, 2006).

Todos os lançamentos do *Python* são *Open Source* (Código Aberto), com licença compatível com a *General Public License* (GPL), porém menos restritiva, permitindo que o *Python* seja inclusive incorporado em produtos proprietários. A especificação da linguagem é mantida pela *Python Software Foundation* (BORGES, 2010).

Segundo Lutz e Ascher (2007), as motivações para utilização dessa linguagem de programação são a qualidade do *software*, conferindo legibilidade, coerência e qualidade do *software* em geral; a produtividade do desenvolvedor, muitas vezes além do que conseguem as linguagens compiladas ou estaticamente tipadas, como C, C++ e Java; a portabilidade do programa, visto que a maioria dos programas em *Python* é executada sem necessidade de alteração das plataformas; as bibliotecas de suporte, que vem com um vasto conjunto de funcionalidades pré-compiladas e portáveis; e a integração de componentes que se comunicam facilmente com outras partes de um aplicativo. Ainda de acordo com os autores, em relação à produtividade, o Código em *Python* normalmente tem de 1/3 a 1/5 do tamanho do código equivalente em C++ ou Java, significando menos digitação, menos depuração e menos manutenção após o desenvolvimento. Por outro lado, sua velocidade de execução pode nem sempre ser tão rápida quanto às linguagens compiladas, como C e C++. No entanto, o ganho de desenvolvimento do *Python* é frequentemente mais relevante do que qualquer perda na velocidade de execução, especialmente em face da velocidade dos computadores modernos.

O *Python* utiliza tipagem dinâmica, o que significa que o tipo de uma variável é inferido pelo interpretador em tempo de execução, *Duck Typing* (BORGES, 2010). Além disso, reduz a quantidade de tempo de planejamento e garante flexibilidade e simplicidade das funções. Ele ostenta uma base de usuários e de desenvolvedores muito ativa, além de ser estável e robusto (LUTZ e ASCHER, 2007). Essas e outras

vantagens fizeram com que empresas e universidades começassem a usar a linguagem com sucesso, como a Philips, NASA, a Aliança Espacial Universal (USA), a Nokia, a Disney, os sites do Google e Yahoo, entre outros (LABAKI, 2006).

O *Python* vem com uma biblioteca de módulos, que pode ser utilizada para todo tipo de tarefa, desde a programação para a *web* até gráficos (DOWNEY *et. al.*, 2009). A simplicidade e o rápido retorno do *Python* também o tornam bom para programação de GUI (*Graphical User Interface*) (LUTZ e ASCHER, 2007). O *Python* vem como uma interface orientada a objetos padrão para API (*Application Programming Interface*) de GUI Tk, chamada Tkinter, que permite aos programas *Python* implementarem GUIs portáteis.

Também existem outros kits de ferramentas de GUI no *Python*, como o QT, GTK, MFC e Swing (Lutz e Ascher, 2007). A ferramenta QT, que também é livre com licença GPL, foi utilizada para desenvolvimento da interface gráfica do SEDIM 2.0.



## FÓRMULAS CLÁSSICAS DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Segundo Carvalho (2008), o sedimento é a partícula derivada das rochas, ou de materiais biológicos, que pode ser transportada por fluído; é o material sólido em suspensão na água ou depositado no leito. É originado da erosão na bacia e da erosão no próprio leito e margens. Nesse sentido, o aumento acelerado do uso do solo e do aproveitamento dos recursos hídricos somados à falta de planejamento urbano e rural teve como consequência a ocupação irregular do solo e a redução de matas ciliares e cobertura vegetal, acarretando, o aumento das erosões nas terras e do transporte sólido nos rios. De acordo com Brito (2012), a erosão hídrica é uma das principais formas de degradação do solo, acarretando prejuízos de ordem econômica, ambiental e social.

Para Carvalho (2008), o termo “carga sólida” se refere ao fenômeno qualitativo do movimento, podendo ser em suspensão, de arrasto, em contato e saltante. O termo “descarga sólida” se refere, por sua vez, à quantidade de movimento. Os valores como descarga sólida em suspensão, de arrasto, total e outros parâmetros derivados dos estudos aplicam-se em muitas áreas de estudos. Mais especificamente, o conhecimento da descarga sólida em suspensão e da concentração é muito importante nos estudos de tratamento de água para abastecimento e em estudos ambientais ligados à flora e à fauna fluvial. O valor da descarga de arrasto, por sua vez, é importante nos estudos de navegação, de morfologia fluvial e formação de depósitos; já o valor de descarga sólida total e de arrasto é importante nos estudos de construção de pontes, de obras fluviais em geral, como portos e tomadas d’água. Por fim, concentração e descarga em suspensão são importantes em estudos de irrigação.

Ainda conforme Carvalho (2008), a descarga sólida de arrasto representa a menor parte da descarga sólida total, correspondendo entre 5 a 10%. A descarga sólida de material do leito corresponde a um valor que inclui a descarga de arrasto e uma parcela da descarga em suspensão cuja composição é de material do leito. As fórmulas desenvolvidas para esse cálculo correspondem à descarga total de sedimento grosso até areias ( $D > 0,062$  mm). A descarga em suspensão, por sua vez, representa a maior quantidade de carga sólida de um curso d’água e pode ser obtida de três formas: por segmentos, como valor total, ou distribuído por faixas de diâmetros de acordo com a granulometria do sedimento.

Devido à complexidade da carga sólida do leito na natureza, existem vários métodos ou fórmulas para a sua determinação (CARVALHO *et al.*, 2000). Segundo Stevens e Yang (1989), as taxas de descarga de sedimentos fluviais dependem de um considerável número de variáveis. Devido à variação delas, grande parte das fórmulas foi desenvolvida com base em uma ou duas variáveis dominantes. Em 1988, Yang descreveu as abordagens básicas utilizadas no desenvolvimento de fórmulas de transporte de sedimentos como deterministas, probabilísticas e de regressão (YANG, 1996).

As fórmulas derivadas da abordagem determinista assumem que existe uma correlação constante entre variáveis dependentes e independentes. A vantagem dessa abordagem é que quando valores das variáveis independentes são fornecidos, as taxas de descarga de sedimentos ou concentrações podem ser calculadas diretamente. Uma desvantagem desta abordagem é que se a relação assumida é inexata, não existe, ou existe apenas em certas condições, os resultados calculados podem ser imprecisos.

Outra abordagem utilizada nas fórmulas de transporte de sedimentos é baseada nas previsões de movimento de partículas derivadas de considerações de probabilidade. As equações definem o início e a cessação do movimento dos sedimentos, bem como a taxa média de descarga de sedimentos.

Por fim, a análise de regressão utiliza relações empíricas entre valores de descarga e alguns parâmetros do escoamento e de sedimento. Uma vantagem dessa abordagem é que ela pode fornecer relações do lugar específico de forma rápida. Uma desvantagem é que a técnica não fornece muito significado físico ou explicação do processo de descarga de sedimentos. Uma fórmula obtida puramente a partir da análise de regressão pode ser aplicada apenas a condições que são semelhantes às utilizadas na obtenção da fórmula de regressão.

A abordagem usual é correlacionar a concentração de sedimentos ou uma taxa de transporte adimensional com um parâmetro principal. Na Tabela 1, a seguir, pode-se observar a relação das fórmulas clássicas para cálculo da descarga sólida com os tipos de abordagem, sedimento e granulometria.

Os resultados obtidos a partir das equações de cálculo de descarga sólida, geralmente diferem consideravelmente entre si e das observações no campo. Isso ocorre, porque foram estabelecidas em laboratório, em condições controladas (YANG,

1996). A seleção das equações mais adequadas para as diferentes condições ambientais e de fluxo de sedimentos consideram conceitos básicos de hidrossedimentologia e seus limites de aplicação desafiam o profissional nessa complexa tarefa. Segundo Carvalho *et al.* (2000), a descarga sólida depende de muitos fatores, tais como hidrológicos, geológicos e climáticos, tornando difícil a escolha do método ou da fórmula.

Tabela 1 - Relação das fórmulas clássicas para cálculo da descarga sólida com os tipos de abordagem, sedimento e granulometria.  
Fonte: Adaptado de Stevens e Yang, 1989.

Autor da Fórmula	Data	Carga do Leito (B) ou Carga de Material do Leito (BM)	Tipo de Fórmula (1)	Tipo de Sedimento (2)	Granulometria (3)
Ackers & White (*)	1973	BM	D	S	S, G
Colby	1964	BM	D	S	S
Engelund & Hansen (*)	1967	BM	D	S	S
Kalinske	1947	B	D	M	S
Laursen	1958	BM	D	M	S
Meyer-Peter & Muller	1948	B	D	S	S, G
Rottner	1959	B	D	S	S
Schoklitsch	1934	B	D	M	S, G
Yang (areia) (*)	1973	BM	D	O	S
Yang (pedregulho) (*)	1984	BM	D	O	G

Legenda:

(\*) Consideradas de maior confiança por Stevens e Yang.

(1) Determinística (D) ou Probabilística (P).

(2) Fração granulométrica (S), composição ou mistura (M), ou Opcional (O).

(3) Areia (S), Pedregulho (G).

Para a seleção da fórmula adequada, podem ser aplicados os seguintes critérios:

1. determinar o tipo de dados de campo, disponíveis ou mensuráveis, dentro das limitações de tempo, recursos financeiros e de mão de obra;
2. examinar todos os dados e tentativas de campo utilizados para o desenvolvimento de cada fórmula, fazendo a seleção baseada nas variáveis independentes;

3. comparar a condição de campo e as limitações das fórmulas selecionadas. Se mais de uma fórmula pode ser usada, calcular o valor da descarga sólida obtido em cada uma e em seguida comparar os resultados;
4. decidir quais as fórmulas que melhor se ajustam à descarga sólida medida, usando-as para o cálculo dentro das condições de escoamento que não são medidas” (STEVENS e YANG, 1989).

Como se pode observar, a automatização dos cálculos de descarga sólida, através de um *software*, economiza o tempo do pesquisador ou profissional, bem como concede segurança nos cálculos, tornando-se uma ferramenta importante no estudo do transporte de sedimentos.

Em 1989, foi apresentado o código computacional SEDDISCH para o cálculo do transporte de sedimentos, em linguagem Fortran 77, com apresentação em DOS e resultados em unidades inglesas (STEVENS e YANG, 1989). As fórmulas foram selecionadas baseadas no suporte teórico que apresentam e no grau de aplicação pelo autor e por outros técnicos, bem como no maior uso por engenheiros e pesquisadores (CARVALHO, 2008). Posteriormente, Hora (1996) adaptou o código para ambiente Windows, em QBASIC, criando uma interface gráfica, intitulada SEDIM 1.0, com resultados em unidades inglesas e no sistema métrico. O código computacional foi desenvolvido com o objetivo de calcular a vazão sólida do material do leito que se movimenta essencialmente por arraste (*bed-load*) e que se movimenta por arraste e suspensão (*bed-material*).

No entanto, a versão 1.0 apresenta problemas de incompatibilidade com os atuais sistemas operacionais. Dessa forma, a atualização do *software* se fez necessária, a fim de garantir a sua sobrevivência.

## Fórmulas Clássicas Representativas do Material do Leito que se Movimenta Essencialmente por Arraste<sup>1</sup>

- Fórmula de Schoklitsch (1934)

A fórmula de Schoklitsch foi desenvolvida a partir de dados de calha de Gilbert, 1914, para areias de granulometria variando de 0,3 a 5,0 mm. O princípio desta fórmula é a de que o material do leito começa a se deslocar com uma determinada vazão crítica e que a descarga sólida por arraste é proporcional a uma taxa de trabalho realizada pela força trativa em excesso daquela necessária para superar a resistência ao longo do perímetro molhado. A fórmula aplica-se a misturas através do somatório das descargas do material do leito para todas as classes granulométricas, sendo que cada uma destas descargas é calculada a partir do diâmetro médio e da fração representativa de cada faixa granulométrica. Desta forma, a equação é dada por:

$$g_s = \sum_{i=1}^n i_b \frac{25}{\sqrt{D_{si}}} S^{3/2} (q - q_0) \quad (1)$$

$$q_0 = \frac{0,0638 \cdot D_{si}}{S^{4/3}} \quad (2)$$

onde:

$g_s$       descarga sólida linear por arraste para cada fração  $i_b$  do material do leito, em lb/s/ft.

$i_b$       fração granulométrica do material do leito, em peso.

$D_{si}$       diâmetro médio representativo da classe granulométrica  $i$  considerada, em in.

$S$       gradiente de energia, em ft/ft.

$q_0$       descarga crítica linear por arraste, em ft<sup>2</sup>/s/ft, para cada fração de diâmetro  $D_{si}$ .

$q$       vazão líquida linear, em ft<sup>3</sup>/s/ft.

$n$       número de classes granulométricas representativas do material do leito.

---

<sup>1</sup> Adaptado de Hora (1996) e Carvalho (2008).

- Fórmula de Kalinske (1947)

A fórmula foi desenvolvida para o cômputo da descarga sólida por arraste para granulometria uniforme, material unigranular, e baseia-se na equação de continuidade, ou seja, a descarga sólida por arraste é igual ao produto da velocidade média das partículas em movimento pelo peso de cada partícula e pelo número de partículas. A velocidade média de cada partícula é função da tensão crítica sobre a tensão total. O peso específico é uma constante e o número de partículas em movimento é função da tensão de cisalhamento atuante sobre a área do leito. A fórmula pode ser aplicada a misturas através do somatório das descargas do material do leito para todas as classes granulométricas. Para cada classe a proporção do leito sujeita ao cisalhamento é expressa como sendo uma função do diâmetro médio e da fração representativos de cada uma das faixas granulométricas. A expressão é dada por:

$$g_s = 25,28 \sqrt{\tau_o} \sum_{i=1}^n \tau_{ci} \frac{i_b}{m} \left[ \frac{\bar{U}_g}{\bar{U}} \right] \quad (3)$$

$$\log \left[ \frac{\bar{U}_g}{\bar{U}} \right] = -0,068 - 1,1328 \cdot \left[ \frac{\tau_{ci}}{\tau_o} \right] + 0,94 \cdot \left[ \frac{\tau_{ci}}{\tau_o} \right]^2 - 1,206 \cdot \left[ \frac{\tau_{ci}}{\tau_o} \right]^3 +$$

$$+ 0,567 \cdot \left[ \frac{\tau_{ci}}{\tau_o} \right]^4 - 0,0975 \cdot \left[ \frac{\tau_{ci}}{\tau_o} \right]^5 \quad (4)$$

$$\tau_o = g \cdot h \cdot S \quad (5)$$

$$\tau_{ci} = 12 \cdot D_{si} \quad (6)$$

$$m = \sum_{i=1}^n \frac{i_b}{D_{si}} \quad (7)$$

onde:

- $\bar{U}_g$  velocidade média das partículas, da classe granulométrica  $i$  considerada, em ft/s.
- $\bar{U}$  velocidade média do escoamento próxima do leito, em ft/s.
- $\tau_o$  tensão tangencial junto ao fundo, em lb/ft<sup>2</sup>.
- $\tau_{ci}$  tensão tangencial crítica, em lb/ft<sup>2</sup>.
- $h$  profundidade média, em ft.
- $g$  aceleração da gravidade, em ft/s<sup>2</sup>.

- Fórmula de Meyer-Peter e Müller (1948)

Meyer-Peter e Müller desenvolveram uma fórmula empírica para a descarga por arraste em escoamentos naturais, cuja expressão, em unidades inglesas, para canais retangulares largos  $\left(\frac{Q_s}{Q} = 1\right)$  é apresentada a seguir:

$$g_s = \left[ 0,368 \frac{Q_s}{Q} \left( \frac{D_{90}^{1/6}}{n_m} \right)^{3/2} h \cdot S - 0,0698 \cdot D_m \right]^{3/2} \quad (8)$$

$$n_m = \frac{1,486 \cdot h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{U} \quad (9)$$

$$D_m = \sum_{i=1}^n D_{si} \cdot i_b \quad (10)$$

onde:

- $Q_s$  parte da vazão líquida capaz de retirar e transportar o sedimento ao longo do leito, em ft<sup>3</sup>/s.
- $Q$  vazão líquida total, em ft<sup>3</sup>/s.
- $n_m$  coeficiente de rugosidade de Manning.
- $D_{90}$  diâmetro característico do material do leito tal que 90%, em peso, das partículas sejam menores, em mm.

- $D_m$  diâmetro médio característico da amostra do material do leito, em mm.  
 $U$  velocidade média do escoamento, em ft/s.

Shepard, em 1960, apresentou expressões para avaliação dos termos  $Q_s/Q$  e  $n_m$  quando as margens da seção tivessem influência no cômputo da descarga do material do leito.

- Fórmula de Rottner (1959)

Rottner desenvolveu uma equação de modo a expressar a descarga por arraste em função de parâmetros do escoamento, baseado em estimativas dimensionais e em coeficientes empíricos. Utilizando os dados de Johnson, 1943, ele aplicou uma regressão para determinar o efeito da rugosidade relativa,  $D_{50}/p$ . A equação não leva em conta o efeito das paredes e da configuração do leito do canal ou escoamento e não pode ser aplicada quando pequenas quantidades de material do leito estão em movimento, sendo expressa por:

$$g_s = \gamma_s [(s-1).g.h^3]^{1/2} \left\{ \frac{U}{\sqrt{(s-1).g.h}} \left[ 0,667.\left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{2/3} + 0,14 \right] - 0,778.\left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{2/3} \right\}^3$$

(11)

onde:

- $\gamma_s$  peso específico do sedimento, em lb/ft<sup>3</sup>.  
 $s$  densidade relativa do sedimento, igual a 2,65.  
 $D_{50}$  diâmetro característico do material do leito, tal que 50%, em peso, das partículas sejam menores, em mm.



## Fórmulas Clássicas Representativas do Material do Leito que se Movimenta em Arraste e Suspensão<sup>2</sup>

- Fórmula de Laursen (1958)

A fórmula baseia-se em relações empíricas e foi desenvolvida a partir de dados obtidos com sedimentos naturais de gravidade específica igual a 2,65 e com diâmetro médio variando de 0,011 a 4,08 mm. A concentração da descarga sólida do material do leito é definida como sendo:

$$C = 10^4 \sum_{i=1}^n i_b \left[ \frac{D_{si}}{h} \right]^{7/6} \left[ \frac{V^2}{58 \cdot Y_c \cdot D_{si} \cdot (s-1) \cdot g \left( \frac{D_{50}}{d} \right)^{1/3}} - 1 \right] f \left( \frac{u_*}{w_i} \right) \quad (12)$$

onde:

C      concentração da descarga do material do leito, em ppm.

$w_i$     velocidade de queda do grão de diâmetro  $D_{si}$ , em ft/s.

$Y_c$     coeficiente que relaciona as forças tangenciais críticas com os diâmetros do sedimento. Os seus valores são:

$$Y_c = 0,04 \quad \text{para } \frac{D_{si}}{\delta} > 0,1 \quad (13)$$

$$Y_c = 0,08 \quad \text{para } 0,1 > \frac{D_{si}}{\delta} > 0,03 \quad (14)$$

$$Y_c = 0,16 \quad \text{para } 0,03 > \frac{D_{si}}{\delta} \quad (15)$$

$\delta$       espessura da camada laminar, em ft, e igual a:

$$\delta = 11,6 \cdot \left[ \frac{v}{u_*} \right] \quad (16)$$

A descarga sólida total por unidade de largura ( $g_s$ ) é dada por:

---

<sup>2</sup> Adaptado de Hora (1996) e Carvalho (2008).

$$g_s = 0,0027 \cdot \sum_{i=1}^n C_i \cdot h \cdot U \quad (17)$$

Onde,  $C_i$  representa o somatório da concentração em cada uma das classes granulométricas.

- Fórmula de Engelund e Hansen (1967)

Os autores aplicaram o conceito de poder da corrente de Bagnold e o princípio da similaridade no desenvolvimento de sua equação, expressa por:

$$g_s = \frac{0,05 \cdot \gamma_s \cdot U^2 \cdot h^{3/2} \cdot S^{3/2}}{D_{50} \cdot g^{1/2} (s-1)^2} \quad (18)$$

- Fórmula de Colby (1964)

Colby apresentou em 1964 um método gráfico para a determinação da descarga sólida do material do leito cuja granulometria varie entre 0,1 a 0,8 mm. O programa utiliza as equações de Nordin, 1986, que representam os gráficos definidos por Colby. A descarga sólida do material do leito é dada por:

$$g_s = A_Y \cdot [U - (0,4673 \cdot h^{0,1} \cdot D_{50}^{0,33})]^{B'} [1 + (AF - 1) \cdot CF] \cdot 0,672 \quad (19)$$

onde:

$B'$  expoente, cujos valores podem ser:

$$B = 2,5 \quad \text{para } [U - (0,4673 \cdot h^{0,1} \cdot D_{50}^{0,33})] < 1 \quad (20)$$

$$B = 1,453 \cdot D_{50}^{-0,138} \quad \text{para } [U - (0,4673 \cdot h^{0,1} \cdot D_{50}^{0,33})] > 1 \quad (21)$$

$A_Y$  coeficiente cujo valor é determinado através de equações potenciais, em função da profundidade média ( $h$ ) e de  $D_{50}$ , de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de Ajuste

D <sub>50</sub> (mm)	A <sub>γ</sub>	CF
0,1	1,453 h <sup>0,61</sup>	0,64
0,2	1,329 h <sup>0,48</sup>	1,00
0,3	1,400 h <sup>0,3</sup>	1,00
0,4	1,260 h <sup>0,3</sup>	0,88
0,8	1,099 h <sup>0,3</sup>	0,20

AF coeficiente de ajuste para correção da influência da temperatura, através de interpolação. AF é igual a 1 para temperaturas de água de 15,6 °C.

CF coeficiente de ajuste para correção da concentração de sedimentos finos, cujos valores também estão apresentados na Tabela 2.

- **Fórmula de Ackers e White (1973)**

Ackers e White desenvolveram uma equação de descarga sólida em função de três termos adimensionais: diâmetro ( $D_{gr}$ ), mobilidade ( $F_{gr}$ ), descarga ( $G_{gr}$ ). Eles consideraram que os sedimentos mais grossos são transportados principalmente por arraste e que uma parte da tensão tangencial atuante no leito do escoamento seria responsável por este movimento. Já os sedimentos mais finos são transportados em suspensão e a tensão total seria efetiva neste movimento. A expressão da descarga adimensional foi desenvolvida a partir do conceito de poder da corrente de Bagnold e baseada em dados de canal de outros pesquisadores. Os parâmetros desta expressão abrangem duas faixas de granulometria de material de fundo, a saber: siltes,  $D_{gr} \geq 1$ , até areias,  $D_{gr} \leq 60$ . Os sedimentos de granulometria mais fina,  $D_{gr} \leq 1$ , possuem propriedades coesivas e desta forma a equação não é aplicável. Para sedimentos de granulometria mais grossa,  $D_{gr} > 60$ , Ackers e White sugerem a adoção do diâmetro  $D_{35}$  em suas expressões, substituindo o diâmetro  $D_{50}$ .

$$G_{gr} = C_A \left( \frac{F_{gr}}{A_{Fr}} - 1 \right)^m$$

(22)

$$F_{gr} = \frac{u_*^{n_D}}{\sqrt{g \cdot D_{50} \cdot (s-1)}} \cdot \left[ \frac{U}{\sqrt{32} \cdot \log\left(\frac{\alpha \cdot h}{D_{50}}\right)} \right]^{n_D} \quad (23)$$

$$D_{gr} = D_{50} \cdot \left[ \frac{g \cdot (s-1)}{u^2} \right]^{1/3} \quad (24)$$

onde:

$G_{gr}$  descarga adimensional de sedimentos.

$D_{gr}$  diâmetro adimensional do grão.

$F_{gr}$  função adimensional da mobilidade.

$\alpha$  coeficiente da equação da rugosidade turbulenta, é igual a 10.

$n_D$  expoente relacionado com o diâmetro do grão.

$A_{Fr}$  valor do número de Froude no movimento inicial.

$m$  expoente da função de transporte de sedimento.

$C_A$  coeficiente da função de transporte de sedimento.

para siltes e areias: faixa de  $1 \leq D_{gr} \leq 60$  ou  $0,04 \leq D_{50} \leq 2,50$  mm tem-se:

$$n_D = 1 - 0,56 \cdot \log D_{gr} \quad (25)$$

$$A_{Fr} = \frac{0,23}{\sqrt{D_{gr}}} + 0,14 \quad (26)$$

$$m = \frac{9,66}{D_{gr}} + 1,34 \quad (27)$$

$$\log C_A = 2,86 \cdot \log D_{gr} - (\log D_{gr})^2 - 3,53 \quad (28)$$

para sedimentos grossos: faixa de  $D_{gr} > 60$  ou  $D_{50} > 2,50$  mm tem-se:  $n_D = 0$ ;  $A_{Fr} = 0,17$ ;  $m = 1,5$  e  $C_A = 0,025$ .

A concentração da descarga do material do leito é dada por:

$$C = \frac{10^6 \cdot G_{gr} \cdot s \cdot D_{50} \cdot \left( \frac{U}{u_*} \right)^n}{h} \quad (29)$$

A expressão da descarga sólida total por unidade de largura ( $g_s$ ) é dada por:

$$g_s = 0,0027 \cdot C \cdot h \cdot U \quad (30)$$

- **Fórmulas de Yang (1973)**

Yang desenvolveu uma equação para computar a concentração da descarga sólida de leitos arenosos baseado em uma análise dimensional e no conceito do poder de corrente unitário. Ele definiu o poder de corrente unitário como sendo uma taxa da energia potencial dissipada por unidade de peso de água.

O programa possui cinco opções de cálculo da vazão sólida do material do leito de acordo com as fórmulas de Yang. A primeira é utilizada quando o material do leito é composto de areia e o  $D_{50}$  representa esta granulometria, a segunda quando o material do leito, composto de areia, é calculado por classes granulométricas; a terceira quando o material do leito é composto de areia e cascalho e o  $D_{50}$  representa esta granulometria, a quarta quando este material é calculado por classes granulométricas. Finalmente, a quinta, também denominada de “Yang Mixture”, é utilizada quando o material do leito, composto de areia e cascalho, é calculado através da segunda e quarta sequências de cálculo. A rotina de cálculo adotada para o cômputo da vazão sólida é a seguinte: para granulometria entre  $0,062 \text{ mm} < D < 2,0 \text{ mm}$  utiliza-se a equação (31), para granulometria entre  $2,00 \text{ mm} < D < 64,00 \text{ mm}$  utiliza-se a equação (32).

1ª opção: para o diâmetro característico igual a  $D_{50}$

2ª opção:

areias variando entre  $0,062 \text{ mm} < D < 2,00 \text{ mm}$ :

$$\log C = 5,435 - 0,286 \cdot \log \frac{w \cdot D_{50}}{v} - 0,457 \cdot \log \frac{u_*}{w} + \left( 1,799 - 0,409 \cdot \log \frac{w \cdot D_{50}}{v} - 0,314 \cdot \log \frac{u_*}{w} \right) \cdot \log \left( \frac{U \cdot S}{w} - \frac{V_{cr} \cdot S}{w} \right) \quad (31)$$

3ª opção:

areias e cascalhos variando entre  $2,00 \text{ mm} < D < 64,00 \text{ mm}$ :

$$\log C = 6,681 - 0,633 \cdot \log \frac{w \cdot D_{50}}{v} - 4,816 \cdot \log \frac{u_*}{w} + \left( 2,784 - 0,305 \cdot \log \frac{w \cdot D_{50}}{v} - 0,282 \cdot \log \frac{u_*}{w} \right) \cdot \log \left( \frac{U \cdot S}{w} - \frac{V_{cr} \cdot S}{w} \right) \quad (32)$$

$$\frac{V_{cr}}{w} = 0,66 + \frac{2,5}{\log \left( \frac{u_* \cdot D_{50}}{v} \right) - 0,06} \quad \text{para } 1,2 < \frac{u_* \cdot D_{50}}{v} < 70 \quad (33)$$

$$\frac{V_{cr}}{w} = 2,05 \quad \text{para } 70 \leq \frac{u_* \cdot D_{50}}{v} \quad (34)$$

onde:

$w$  velocidade média de queda da partícula de diâmetro  $D_{50}$ , em ft/s.

$V_{cr}$  velocidade média crítica do escoamento no início do movimento, em ft/s.

4ª opção:

classes granulométricas - areias variando entre  $0,062 \text{ mm} < D < 2,00 \text{ mm}$ :

$$\log C = 5,435 - 0,286 \cdot \log \frac{w \cdot D_{si}}{v} - 0,457 \cdot \log \frac{u_*}{w} +$$

$$+\left(1,799 - 0,409 \cdot \log \frac{w \cdot D_{si}}{v} - 0,314 \cdot \log \frac{u_*}{w}\right) \log \left(\frac{U \cdot S}{w} - \frac{V_{cr} \cdot S}{w}\right) \quad (35)$$

5ª opção:

classes granulométricas - areias e cascalhos variando entre 2,00 mm < D < 64,00 mm:

$$\log C = 6,681 - 0,633 \cdot \log \frac{w \cdot D_{si}}{v} - 4,816 \cdot \log \frac{u_*}{w} + \\ + \left(2,784 - 0,305 \cdot \log \frac{w \cdot D_{si}}{v} - 0,282 \cdot \log \frac{u_*}{w}\right) \log \left(\frac{U \cdot S}{w} - \frac{V_{cr} \cdot S}{w}\right) \quad (36)$$

$$\frac{V_{cr}}{w} = 0,66 + \frac{2,5}{\log \left(\frac{u_* \cdot D_{si}}{v}\right) - 0,06} \quad \text{para } 1,2 < \frac{u_* \cdot D_{si}}{v} < 70 \quad (37)$$

$$\frac{V_{cr}}{w} = 2,05 \quad \text{para } 70 \leq \frac{u_* \cdot D_{si}}{v} \quad (38)$$

$$C = \sum_{i=1}^n i_b \cdot C_i \quad (39)$$

onde:

$C_i$  concentração representativa da classe granulométrica i considerada, em ppm.

## DETERMINAÇÃO DE OUTROS PARÂMETROS

- Descarga Sólida em Suspensão

$$g_{ss} = 0,0864 \cdot Q_L \cdot C \quad (40)$$

onde:

$g_{ss}$  descarga sólida em suspensão, em t.dia<sup>-1</sup>.

$Q_L$  descarga líquida, em m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

$C$  concentração de sedimentos em suspensão, em mg.l<sup>-1</sup>.

- Gradiente de Energia

$$S = \left( \frac{Q \cdot n}{A \cdot R^{2/3}} \right)^2 \quad (41)$$

onde:

S gradiente de energia em ft.ft<sup>-1</sup>.

Q descarga líquida em ft<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

R raio hidráulico em ft.

A área da seção em ft<sup>2</sup>.

N coeficiente de rugosidade.

O valor do raio hidráulico é considerado igual à profundidade média do curso d'água em condições de rios largos e rasos e o coeficiente de rugosidade é obtido de tabelas (CHOW, 1959). Para caso de areias, de fina a média, o coeficiente de rugosidade varia de 0,020 a 0,027; para areias de 1 a 2 mm, o valor do coeficiente varia de 0,026 a 0,035; para pedregulhos de 2 a 64 mm, o coeficiente varia de 0,026 a 0,038, enquanto para argilas é igual a 0,030 (CARVALHO, 2008). É importante ressaltar que essa fórmula fornece um valor aproximado para o gradiente de energia.

- Diâmetro médio de partículas

$$D_m = \sum_{i=1}^m D_{si} \cdot i_f \quad (42)$$

onde:

D<sub>m</sub> diâmetro médio de partículas.

D<sub>si</sub> diâmetro médio geométrico entre dois diâmetros de uma faixa.

i<sub>f</sub> fração granulométrica entre os dois diâmetros, apresentados por %.



## APLICABILIDADE DO SOFTWARE

A interface gráfica do Sedim 2.0 pode ser observada na Figura 1.

SEDIM 2.0

Arquivo Ajuda

Local:

Data: 01/01/2000

☒ Sistema Métrico ☐ Sistema Inglês

Largura:  m

Profundidade média:  m

Velocidade média:  m/s

Temperatura:  °C

D35:  mm

D50:  mm

D65:  mm

D90:  mm

Declividade:  m/m

Descarga Líquida:  m<sup>3</sup>/s

Raio Hidráulico:  m

Área da Seção:  m<sup>2</sup>

Coeficiente de Rugosidade:  (n)

Calcular Declividade

Dados das frações de tamanho em porcentagem:

0,000 a 0,062 mm:  %

0,062 a 0,125 mm:  %

0,125 a 0,250 mm:  %

0,250 a 0,500 mm:  %

0,500 a 1,000 mm:  %

1,000 a 2,000 mm:  %

2,000 a 4,000 mm:  %

4,000 a 8,000 mm:  %

8,000 a 16,00 mm:  %

16,00 a 32,00 mm:  %

32,00 a 64,00 mm:  %

☐ Arraste e Suspensão

☐ Laursen

☐ Engelund e Hansen

☐ Colby

☐ Ackers e White (D50)

☐ Ackers e White (D35)

☐ Yang Sand (D50)

☐ Yang Sand (FT)

☐ Yang Gravel (D50)

☐ Yang Gravel (FT)

☐ Yang Sand e Gravel

☐ Arraste

☐ Schoklitsch

☐ Kalinske

☐ Meyer-Peter e Muller I

☒ Rottner

Calcular

UFF Universidade Federal Fluminense

PGE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS

CAPES

Figura 1 - Interface Gráfica do Sedim 2.0

Fonte: Campeão, 2017.

Como se pode observar, manteve-se o layout próximo ao que era apresentado na versão 1.0. A maior modificação é o quadro de cálculo de declividade, que não é mais uma janela isolada. O software atende às necessidades e requisitos que motivaram a sua construção, ou seja, a atualização dos sistemas operacionais e a extração dos resultados em planilha eletrônica (CAMPEÃO, 2017).

No que tange a confiabilidade dos resultados, o SEDIM 2.0 apresentou resultados muito próximos, senão iguais, ao SEDIM 1.0 (1996) e ao SEDDISCH (1989). As diferenças percentuais observadas, justificadas pelas casas decimais, se mantiveram abaixo de 1%, permitindo inferir que o programa apresenta resultados consistentes e compatíveis com as versões anteriores.

A interface com o usuário é bastante intuitiva e de fácil entendimento, permitindo a sua operação com facilidade. Além disso, o programa não apresenta limitações/restrições de uso e nos cálculos realizados o tempo de processamento é muito curto, menos de 1 segundo, o que permite inferir que não há perda de velocidade.

No aspecto portabilidade, o programa está preparado para operar em *Windows* 64 e 32 bits, garantindo a sua vida útil. Ademais, por ser um *software* livre, o SEDIM 2.0 permite a sua constante atualização, bem como a sua integração com outros programas já existentes. De posse do seu código fonte, existem inúmeras possibilidades de novas implementações, desde que assegurados os termos e condições da licença GPL.

A perpetuação do programa é de considerável relevância para os estudos hidrossedimentológicos, economizando o tempo do profissional da área, oferecendo segurança nos resultados e minimizando os erros, diante da complexidade das fórmulas de cálculo de descarga sólida.

Sendo assim, o SEDIM 1.0, que foi amplamente utilizado por vários anos, volta a ser compatível com os atuais sistemas operacionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELING Fábio Alex; PAIVA, João Batista Dias de Paiva; SCAPIN, Juliana. *Avaliação de Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em um Pequeno Rio Urbano*. Santa Maria: RBRH, 2007. DOI: 10.21168/rbrh.v12n4.p5-21.

BORGES, Luiz Eduardo. *Python para Desenvolvedores*. 2. ed. Rio de Janeiro: edição do autor, 2010. 360p.

BRITO, Annanery de Oliveira. *Estudos da Erosão no Ambiente Urbano, Visando Planejamento e Controle Ambiental no Distrito Federal*. 2012. 77p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.

CAMPEÃO, Roberta de Almeida Costa. *Ferramenta computacional para o cálculo do transporte de sedimentos, SEDIM 2.0*. 2017. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biossistemas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói.

CARVALHO, Newton de Oliveira. *Hidrossedimentologia prática*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 768p.

CARVALHO, Newton de Oliveira; FILIZOLA JÚNIOR, Naziano Pantoja; SANTOS, Paulo Marcos Coutinho dos; LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck. *Guia de práticas sedimentométricas*. Brasília, DF: ANEEL, 2000. 154p.

CARVALHO, Newton de Oliveira; HORA, Mônica de Aquino Galeano Massera. *Hidrossedimentometria*. In: Cristiano Poletto (Org.). *Sedimentologia Fluvial: Estudos e Técnicas*. 1. ed. Porto Alegre: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2014, p. 11-61.

CHOW, Ven Te. *Open-channel Hydraulics*. Nova York: McGraw-Hill Book Company, INC, 1959. 680p.

DOWNEY, Allen. *Think Python*. California: O'Reilly Media, 2012. 278p.

DOWNEY, Allen; ELKNER, Jeff; MEYERS, Chris. *Aprenda Computação com Python 3.0*. Versão 1. 2009. Disponível em: <<https://chevitarese.files.wordpress.com/2009/09/aprendacomputaocompython3k.pdf>>. Acesso em 10 abr. de 2018.

HORA, Mônica de Aquino Galeano Massera. *Avaliação do Transporte de Sedimentos da Sub-bacia do Ribeirão do Rato, Região Noroeste do Estado do Paraná*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996. 287p.

LABAKI, Josué. *Introdução a Python: Módulo A*. Grupo Python. UNESP. São Paulo, Ilha Solteira, 2006. Disponível em:

<<http://www.dcc.ufrj.br/~fabiom/python/pythonbasico.pdf>>. Acesso em 10 abr. de 2018.

LUTZ, Mark; ASCHER, David. *Aprendendo Python*. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007. 568p.

POLETO, Cristiano. *Ambiente e Sedimentos*. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2008. 404p.

STEVENS, Herbert H. Jr; YANG, Chih Ted. *Summary and use of selected fluvial sediment-discharge formulas*: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations. Report 89-4026. Lakewood, Colorado, 1989. 121 p.

YANG, Chih Ted. *Sediment Transport – Theory and Practice*. Nova York: McGraw-Hill, 1996.

**APÊNDICE A**

**CÓDIGO FONTE DO SEDIM 2.0**

**APÊNDICE B**  
**MANUAL DO USUÁRIO**

## MANUAL DO USUÁRIO

O Sedim 2.0 é um código computacional concebido para calcular a vazão sólida do material do leito que se movimenta essencialmente por arraste (*bed-load*) e que se movimenta por arraste e suspensão (*bed-material*). Para isso, possui 10 fórmulas de arraste e suspensão e 4 fórmulas somente de arraste, conforme a Figura 1.

A versão 2.0 do programa é portátil, ou seja, não precisa ser instalada. Para *Windows*, existem duas versões, 32 e 64 *bits*, portanto, é importante se certificar que a versão a ser usada é compatível com o sistema operacional disponível.

Para sua utilização, basta abrir com dois cliques o arquivo intitulado *Sedim.exe*. O programa é bastante intuitivo, conforme se pode observar na Figura 2.

SEDIM 2.0

Arquivo Ajuda

Local:

Data: 01/01/2000

☒ Sistema Métrico ☐ Sistema Inglês

Largura:  m

Profundidade média:  m

Velocidade média:  m/s

Temperatura:  °C

D35:  mm

D50:  mm

D65:  mm

D90:  mm

Declividade:  m/m

Descarga Líquida:  m3/s

Raio Hidráulico:  m

Área da Seção:  m2

Coeficiente de Rugosidade:  (n)

Calcular Declividade

Dados das frações de tamanho em porcentagem:

0,000 a 0,062 mm:	<input type="text"/> %
0,062 a 0,125 mm:	<input type="text"/> %
0,125 a 0,250 mm:	<input type="text"/> %
0,250 a 0,500 mm:	<input type="text"/> %
0,500 a 1,000 mm:	<input type="text"/> %
1,000 a 2,000 mm:	<input type="text"/> %
2,000 a 4,000 mm:	<input type="text"/> %
4,000 a 8,000 mm:	<input type="text"/> %
8,000 a 16,00 mm:	<input type="text"/> %
16,00 a 32,00 mm:	<input type="text"/> %
32,00 a 64,00 mm:	<input type="text"/> %

**Arraste e Suspensão**

☐ Laursen

☐ Engelund e Hansen

☐ Colby

☐ Ackers e White (D50)

☐ Ackers e White (D35)

☐ Yang Sand (D50)

☐ Yang Sand (FT)

☐ Yang Gravel (D50)

☐ Yang Gravel (FT)

☐ Yang Sand e Gravel

**Arraste**

☐ Schoklitsch

☐ Kallinske

☐ Meyer-Peter e Muller I

☒ Rottner

Calcular

UFF Universidade Federal Fluminense

PGE3 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS

CAPES

Figura 2 - Interface Gráfica do Sedim 2.0  
Fonte: Campeão, 2017.

O programa possui dois sistemas de medidas, o métrico e o inglês. Conforme o sistema de medida selecionado, os dados de entrada devem ser inseridos nas unidades descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Unidades dos dados de entrada

Dado de Entrada	Sistema Métrico	Sistema Inglês
Largura	m	ft
Profundidade Média	m	ft
Velocidade média	m/s	ft/s
Temperatura	°C	°C
D35	mm	mm
D50	mm	mm
D65	mm	mm
D90	mm	mm
Declividade	m/m	ft/ft
Descarga Líquida	m <sup>3</sup> /s	ft <sup>3</sup> /s
Raio Hidráulico	m	ft
Área da Seção	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>
Coefficiente de Rugosidade	adimensional	adimensional

Para o dado de entrada “Declividade”, é possível inseri-lo manualmente ou calculá-lo na janela ilustrada na Figura 3.

A interface de cálculo da declividade apresenta quatro campos de entrada verticais. O primeiro campo, rotulado 'Descarga Líquida', possui uma unidade 'm3/s' à direita. O segundo campo, 'Raio Hidráulico', possui a unidade 'm'. O terceiro campo, 'Área da Seção', possui a unidade 'm2'. O quarto campo, 'Coeficiente de Rugosidade', possui a unidade '(n)'. Abaixo dos campos, há um botão retangular com o texto 'Calcular Declividade'.

Figura 3 – Cálculo da declividade  
Fonte: Campeão, 2017.

Ao clicar o botão “Calcular Declividade”, o programa insere automaticamente o resultado na caixa de texto reservada para o valor de “Declividade”.



O programa aceita apenas ponto como separador de decimais. Portanto, caso seja digitada alguma vírgula, aparecerá uma janela indicativa de erro, conforme a Figura 4.

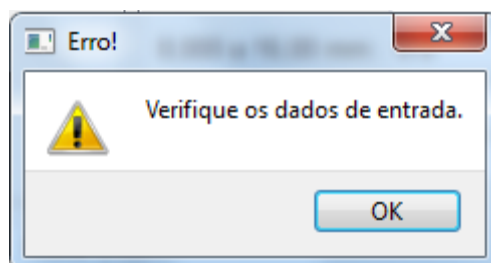


Figura 4 – Tela de erro  
Fonte: Campeão, 2017.

A mesma mensagem de erro aparecerá caso algum dado de entrada não seja preenchido. Dessa forma, é necessário preencher com "0.0", caso não possua algum dado, exceto para o quadro do cálculo da declividade, que pode ficar vazio, desde que seja inserido manualmente o valor da declividade.

Para salvar a medição, basta clicar em "Arquivo" e, em seguida, em "Salvar". O arquivo será salvo na pasta onde se encontra o arquivo executável do SEDIM 2.0 com o nome inserido no campo "Local" com a extensão .ini, ou seja, "Local.ini".

Após preencher todos os campos, bastar selecionar as equações desejadas e clicar o botão "calcular". Os resultados, então, serão exportados, conforme a Figura 5.

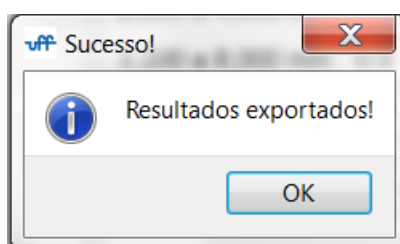


Figura 5 – Tela de sucesso nos cálculos  
Fonte: Campeão, 2017.

As fórmulas de Laursen, Yang Sand FT, Yang Gravel FT, Yang Mix FT, Schoklitsch e Kalinske, além dos resultados totais, apresentam também os valores de concentração por faixa granulométrica. Essas fórmulas não poderão ser utilizadas, caso os valores de faixas granulométricas não sejam inseridos. Para as fórmulas de

arraste e suspensão, é considerado o cálculo para diâmetros maiores do que 0,062 mm. Nas fórmulas de arraste, no entanto, já são consideradas todas as faixas.

Os resultados são exportados em formato de planilha eletrônica para a pasta onde se encontra o arquivo executável do SEDIM 2.0, e o arquivo será nomeado com o nome inserido no campo "Local", ou seja, "Local.xlsx".

### Exemplo com uso do sistema inglês

#### Dados de Entrada: Medição no Rio Grande, EUA

Fonte: Adaptado de Stevens e Yang, 1989.

Rio Grande – 14/04/1986			
Largura da Seção (ft)	272,00	Profundidade Média (ft)	2,470
Velocidade Média (ft/s)	4,060	Descarga Líquida (ft³/s)	2727,67
Temperatura da Água (°C)	14,400	Declividade da Linha da Água (ft/ft)	0,000890
Viscosidade Cinemática (ft²/s)	0,00001246	Velocidade de Queda do Sedimento (ft/s)	0,0939
D35 (mm)	0,191	D50 (mm)	0,231
D65 (mm)	0,280	D90 (mm)	0,445
Faixas Granulométricas (mm)			
0,000 - 0,062	2,10%	2,000 - 4,000	0,40%
0,062 - 0,130	8,70%	4,000 - 8,000	0,30%
0,130 - 0,250	45,70%	8,000 - 16,000	0,50%
0,250 - 0,500	36,90%	16,000 - 32,000	0,00%
0,500 - 1,000	4,80%	32,000 - 64,000	0,00%
1,000 - 2,000	0,60%		

**Tela com preenchimento dos dados de entrada**  
(separador decimal ponto e granulometria sem valor de porcentagem digitar o número zero)

The screenshot shows the SEDIM 2.0 software interface. It includes a menu bar with 'Arquivo' and 'Ajuda'. The main area is divided into three sections:

- Left Section:** Contains input fields for 'Local' (Grande), 'Data' (14/04/1989), 'Sistema Métrico' (selected), 'Sistema Inglês' (unselected), 'Largura' (272 ft), 'Profundidade média' (2.47 ft), 'Velocidade média' (4.06 ft/s), 'Temperatura' (14.4 °C), and sediment size parameters (D35: 0.191 mm, D50: 0.231 mm, D65: 0.28 mm, D90: 0.445 mm, Declividade: 0.00089 ft/ft). Below these are fields for 'Descarga Líquida' (ft³/s), 'Raio Hidráulico' (ft), 'Área da Seção' (ft²), and 'Coeficiente de Rugosidade' (n), with a 'Calcular Declividade' button.
- Middle Section:** Titled 'Dados das frações de tamanho em porcentagem:', it lists 12 size ranges with their corresponding percentages (e.g., 0,000 a 0,062 mm: 2.1 %).
- Right Section:** A list of calculation methods with checkboxes. 'Arraste e Suspensão' and 'Arraste' are checked. Other methods include Laursen, Engelund e Hansen, Colby, Ackers e White (D50), Ackers e White (D35), Yang Sand (D50), Yang Sand (FT), Yang Gravel (D50), Yang Gravel (FT), Yang Sand e Gravel, Schoklitsch, Kalinske, Meyer-Peter e Muller I, and Rottner. A 'Calcular' button is at the bottom.

At the bottom of the window, there are logos for 'UFF Universidade Federal Fluminense', 'PGEB PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS', and 'CAPES'.

**Resultado Geral**

Fórmula	Concentração Total (mg/l)	Descarga Sólida Total (t/dia)
Laursen	1933,16	14237,15
Engelund & Hansen	1915,02	14103,55
Colby	1768,79	13026,60
Ackers & White (D50)	2210,88	16282,48
Ackers & White (D35)	3476,46	25603,13
Yang Sand (D50)	1200,47	8841,12
Yang Sand (FT)	1621,56	11942,31
Yang Gravel (D50)	3,18	23,40
Yang Gravel (FT)	6,06	44,64
Yang Sand & Gravel	1611,77	11870,25
Schoklitsch	382,93	2820,18
Kalinske	77,61	571,55
Meyer-Peter & Muller	153,69	1131,85
Rottner	783,74	5772,01

### Resultado por Faixas Granulométricas

Schoklitsch			
Faixa Granulométrica (mm)	Fração (%)	Concentração (mg/l)	Descarga Sólida Total (t/dia)
0,000 - 0,062	2,1	21,78	
0,062 - 0,125	8,7	53,22	
0,125 - 0,250	45,7	193,03	
0,250 - 0,500	36,9	105,35	
0,500 - 1,000	4,8	8,80	
1,000 - 2,000	0,6	0,62	
2,000 - 4,000	0,4	0,14	
4,000 - 8,000	0,3	0,00	
8,000 - 16,000	0,5	0,00	
16,000 - 32,000	0	0,00	
32,000 - 64,000	0	0,00	
<b>Total</b>		<b>382,93</b>	<b>2820,18</b>

Kalinske			
Faixa Granulométrica (mm)	Fração (%)	Concentração (mg/l)	Descarga Sólida Total (t/dia)
0,000 - 0,062	2,1	1,93	
0,062 - 0,125	8,7	7,65	
0,125 - 0,250	45,7	37,77	
0,250 - 0,500	36,9	27,10	
0,500 - 1,000	4,8	2,84	
1,000 - 2,000	0,6	0,24	
2,000 - 4,000	0,4	0,07	
4,000 - 8,000	0,3	0,01	
8,000 - 16,000	0,5	0,00	
16,000 - 32,000	0	0,00	
32,000 - 64,000	0	0,00	
<b>Total</b>		<b>77,61</b>	<b>571,55</b>

## Exemplo com uso do sistema métrico

### Dados de Entrada: Medição no Rio Madeira, Brasil

Fonte: Acervo pessoal do Professor Newton de Oliveira Carvalho.

Rio Madeira - 14/03/2011			
Largura da Seção (m)	812,9	Profundidade Média (m)	19,57
Velocidade Média (m/s)	2,44	Descarga Líquida (m³/s)	38790,0
Temperatura da Água (°C)	27,0	Declividade da Linha da Água (m/m)	0,00009
Viscosidade Cinemática (m²/s)	0,00000085	Velocidade de Queda do Sedimento (m/s)	0,029
D35 (mm)	0,17	D50 (mm)	0,21
D65 (mm)	0,27	D90 (mm)	0,43
Faixas Granulométricas (mm)			
0,000 - 0,062	1,00%	2,000 - 4,000	0,10%
0,062 - 0,125	17,50%	4,000 - 8,000	0,00%
0,125 - 0,250	43,00%	8,000 - 16,000	0,00%
0,250 - 0,500	36,00%	16,000 - 32,000	0,00%
0,500 - 1,000	2,00%	32,000 - 64,000	0,00%
1,000 - 2,000	0,40%		

### Tela com preenchimento dos dados de entrada

(separador decimal ponto e granulometria sem valor de porcentagem digitar o número zero)

The screenshot shows the SEDIM 2.0 software interface. The main window is titled 'SEDIM 2.0' and has a menu bar with 'Arquivo' and 'Ajuda'. The interface is divided into several sections:

- Local:** A text field containing 'Madeira'.
- Data:** A date picker showing '14/03/2011'.
- Sistema:** Two radio buttons: 'Sistema Métrico' (selected) and 'Sistema Inglês'.
- Inputs:** A series of text fields for 'Largura' (812.9 m), 'Profundidade média' (19.57 m), 'Velocidade média' (2.44 m/s), 'Temperatura' (27 °C), 'D35' (0.17 mm), 'D50' (0.21 mm), 'D65' (0.27 mm), 'D90' (0.43 mm), and 'Declividade' (0.00009 m/m).
- Outputs:** Text fields for 'Descarga Líquida' (m³/s), 'Raio Hidráulico' (m), 'Área da Seção' (m²), and 'Coeficiente de Rugosidade' (n), with a 'Calcular Declividade' button below them.
- Dados das frações de tamanho em porcentagem:** A list of size ranges with corresponding percentage input fields: 0,000 a 0,062 mm (1%), 0,062 a 0,125 mm (17.50%), 0,125 a 0,250 mm (43%), 0,250 a 0,500 mm (36%), 0,500 a 1,000 mm (2%), 1,000 a 2,000 mm (0.4%), 2,000 a 4,000 mm (0.1%), 4,000 a 8,000 mm (0%), 8,000 a 16,000 mm (0%), 16,00 a 32,00 mm (0%), and 32,00 a 64,00 mm (0%).
- Arraste e Suspensão:** A section with a checked checkbox and a list of methods: Laursen, Engelund e Hansen, Colby, Ackers e White (D50), Ackers e White (D35), Yang Sand (D50), Yang Sand (FT), Yang Gravel (D50), Yang Gravel (FT), Yang Sand e Gravel, Arraste (checked), Schokitsch, Kallinske, Meyer-Peter e Muller I, and Rottner. A 'Calcular' button is at the bottom.

At the bottom of the window, there are logos for 'UFF Universidade Federal Fluminense', 'PGEB Engenharia de Biosistemas', and 'CAPES'.

### Resultado Geral

Fórmula	Concentração Total (mg/l)	Descarga Sólida Total (t/dia)
Laursen	156,12	577824,73
Engelund & Hansen	680,98	2520397,48
Colby	478,77	1771987,79
Ackers & White (D50)	456,01	1687751,09
Ackers & White (D35)	911,34	3373000,09
Yang Sand (D50)	172,65	639016,53
Yang Sand (FT)	209,45	775217,40
Yang Gravel (D50)	0,01	36,29
Yang Gravel (FT)	0,02	70,17
Yang Sand & Gravel	209,11	773948,69
Schoklitsch	13,45	49780,16
Kalinske	2,57	9524,00
Meyer-Peter & Muller	6,32	23377,43
Rottner	129,52	479381,60

### Resultado por Faixas Granulométricas

Schoklitsch			
Faixa Granulométrica (mm)	Fração (%)	Concentração (mg/l)	Descarga Sólida Total (t/dia)
0,000 - 0,062	1,00	0,33	
0,062 - 0,125	17,50	3,49	
0,125 - 0,250	43,00	5,99	
0,250 - 0,500	36,00	3,48	
0,500 - 1,000	2,00	0,13	
1,000 - 2,000	0,40	0,02	
2,000 - 4,000	0,10	0,00	
4,000 - 8,000	0,00	0,00	
8,000 - 16,000	0,00	0,00	
16,000 - 32,000	0,00	0,00	
32,000 - 64,000	0,00	0,00	
Total	100,00	13,45	49780,16

Kalinske			
Faixa Granulométrica (mm)	Fração (%)	Concentração (mg/l)	Descarga Sólida Total (t/dia)
0,000 - 0,062	1,00	0,03	
0,062 - 0,125	17,50	0,47	
0,125 - 0,250	43,00	1,12	
0,250 - 0,500	36,00	0,90	
0,500 - 1,000	2,00	0,05	
1,000 - 2,000	0,40	0,01	
2,000 - 4,000	0,10	0,00	
4,000 - 8,000	0,00	0,00	
8,000 - 16,000	0,00	0,00	
16,000 - 32,000	0,00	0,00	
32,000 - 64,000	0,00	0,00	
Total	100,00	2,57	9524,00

**APÊNDICE C**

**FATORES DE CONVERSÃO**



Fatores de conversão utilizados no SEDIM 2.0:

<b>Multiplique o sistema inglês</b>	<b>por</b>	<b>para obter o sistema internacional</b>
pé cúbico por segundo (ft <sup>3</sup> /s)	0,02832	metro cúbico por segundo (m <sup>3</sup> /s)
pé (ft)	0,3048	metro (m)
pé por segundo (ft/s)	0,3048	metro por segundo (m/s)
polegada (in.)	25,4	milímetro (mm)
libra (lb)	0,4536	quilograma (kg)
libra por segundo (lb/s)	0,4536	quilograma por segundo (kg/s)
libra por pé (lb/ft)	1,488	quilograma por metro (kg/m)
libra por pé ao quadrado (lb/ft <sup>2</sup> )	4,882	quilograma por metro ao quadrado (kg/m <sup>2</sup> )
libra por pé cúbico (lb/ft <sup>3</sup> )	16,017	quilograma por metro cúbico (kg/m <sup>3</sup> )
pé ao quadrado (ft <sup>2</sup> )	0,0929	metro ao quadrado (m <sup>2</sup> )
pé ao quadrado por segundo (ft <sup>2</sup> /s)	0,0929	metro ao quadrado por segundo (m <sup>2</sup> /s)
<b>Multiplique o sistema métrico</b>	<b>por</b>	<b>para obter o sistema inglês</b>
litro por segundo (l/s)	0,03531	pé cúbico por segundo (ft <sup>3</sup> /s)
metro (m)	3,281	pé (ft)
milímetro (mm)	0,03937	polegada (in.)
tonelada por metro cúbico (t/m <sup>3</sup> )	0,0312	tonelada por pé cúbico (ton/ft <sup>3</sup> )
tonelada por segundo (t/s)	2205	libra por segundo (lb/s)