

Capítulo 82

Transporte de sólidos

“Em engenharia é necessário muito estudo e dedicação”
Prof. dr. Kokei Uehara

SUMÁRIO

Ordem	Assunto
82.1	Introdução
82.2	Transporte de sólido
82.3	Pesquisas feitas pelo FCTH de São Paulo
82.4	Lei de Stokes
82.5	Granulometria dos sedimentos
82.6	Estimativa do tempo de esvaziamento de um reservatório (McCuen, 1988)
82.7	Reserva de sedimentação em um reservatório de detenção
82.7.1	Illinois, USA
82.7.2	Estado da Carolina do Norte, USA
82.7.3	Resíduos sólidos
82.8	Conclusão

Capítulo 13- Transporte de sólidos

82.1 Introdução

O que será apresentado baseia-se nas pesquisas executadas pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica de São Paulo (FCTH) referente aos Anais 5 do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, realizado em Gramado Rio Grande do Sul em 1993 apresentado por Carlos Lloret Ramos, Gisela Coelho Nascimento Helou, Luiz Eduardo de Souza Ikeda, no trabalho denominado “*Campanhas hidrosedimentométricas na região metropolitana de São Paulo*” e nos trabalhos de Carlos Lloret Ramos, Gisela Coelho Nascimento Helou e Giorgio Brighetti denominado “*Dinâmica do transporte sólido nos rios Tietê e Pinheiros na região metropolitana de São Paulo*” cujos resultados das pesquisas serão mostrados adiante em forma de 5 (cinco) tabelas.

Foi consultado o *Plano Diretor de Macrodrenagem do Alto Tietê* elaborado pelo DAEE.

Para a compreensão da dinâmica do transporte sólido nos cursos d’água, convém apresentar algumas definições clássicas das diferentes modalidades de transporte sólido fluvial (Ramos, Helou e Brighetti, 1993 p.258).

82.2 Transporte de sólido

O fenômeno hidráulico dos escoamentos pode possuir fronteiras fixas e fronteiras móveis. Os canais executados em tubos de concreto, possuem fronteiras fixas e neste caso a sua resolução pode ser feita com grande precisão usando, por exemplo, a fórmula de Manning. Para os canais onde as fronteiras são móveis, tem que ser analisado cuidadosamente o problema de transporte de sedimentos. Na prática não existem fórmulas precisas para os problemas de escoamento em fronteiras móveis.

Segundo (Quintela,1981) existem três modos básicos de transporte sólido:

- *transporte sólido por arrastamento*, em que os elementos sólidos rolam e escorregam sobre o fundo;
- *transporte sólido em suspensão*, em que os elementos sólidos se deslocam no seio do escoamento, podendo contatar esporadicamente o fundo;
- *transporte sólido por saltação*, em que os elementos sólidos se deslocam alternadamente por pequenos saltos e por rolamento e escorregamento sobre o fundo.

Na prática são considerados somente dois modos básicos, o arrastamento e a suspensão sendo que a saltação ou saltitação constitui-se numa modalidade híbrida das duas principais (Alfredini,1993).

A velocidade das partículas transportados por arrastamento é sempre muito menor do que as transportadas em suspensão, aproximando-se esta da velocidade média do escoamento. Além disso, as partículas em suspensão deslocam-se permanentemente e as arrastadas movem-se de forma intermitente, alternando períodos de deslocamento com outros de repouso, em geral sob outras partículas de fundo (Alfredini,1993).

Existem outros nomes consagrados para o transporte sólido que são:

- **Transporte sólido de material do fundo (Transporte sólido do material do leito)** correspondente a material cuja granulometria se encontra presente no fundo (Quintela,1981).

Define-se à parcela de material que constitui o leito e é transportado. Ao contrário do que ocorre com a carga de lavagem, o transporte sólido em suspensão do material que provém do leito, passa por alternâncias de remoção, movimentação e deposição (Lloret et al., 1993).

- **Transporte sólido de material de lavagem (wash load) ou Carga de Lavagem**, correspondente a material de dimensões inferiores às do material do fundo (Quintela,1981).

Define-se como a parcela mais fina do material transportado em suspensão, e que é inexistente no leito, ou encontrado em pequenas quantidades.

Um material pode ser considerado carga de lavagem num determinado trecho do rio e material de leito em outro onde a capacidade de transporte é drasticamente reduzida, como no caso do rio Pinheiros em São Paulo (Lloret et al., 1993).

Conforme Alfredini,1993 o transporte de sólidos é importante em um grande número de obras de engenharia hidráulica, como obras de *hidráulica fluvial*, *hidráulica marítima* e nos *aproveitamentos hidráulicos*, como assoreamento de reservatórios.

Exemplo 82.1- Carga de lavagem e transporte do material do leito

No ribeirão dos Meninos em São Paulo, conforme Tabela (82.1) a relação entre Q_{ss} e Q_{st} é 0,75, o que significa que 75% refere-se a carga de lavagem e portanto os 25% restante se refere a materiais do leito do ribeirão.

Nota-se que a carga de lavagem, isto é, o material que está em suspensão é bem maior que o material que está no leito do ribeirão. Para obter estes números é necessário estações de medições.

Basta ver na Tabela (82.1) a variabilidade da relação Q_{ss}/Q_{st} de 0,30 a 1,00 na região do Alto Tietê em São Paulo. Os dados estimativos podem ser colhidos para regiões bem próximas a estas.

Exemplo 82.2 – Parcela que irá contribuir para o assoreamento do curso d'água

Considerando ainda o ribeirão dos Meninos, foi pesquisado que o transporte total de sólidos é de $1.381.000\text{m}^3$ conforme Tabela (82.5) na coluna Va.

Deste total 75% como foi visto acima refere-se a material em suspensão que não irá se depositar, isto é,

$1.381.000 \times 0,75 = 1.035.750\text{m}^3$ é o material que se destina ao leito do ribeirão e o restante 25% ou seja: $1.381.000 - 1.035.750 = 345.250\text{m}^3$.

Portanto, ao leito do ribeirão será destinado 345.250m^3 por ano de sólidos. Mas como foi definido anteriormente uma parte dos sólidos rolam e escorregam pelo fundo do ribeirão, não constituindo propriamente um depósito de material.

Para calcular o que realmente é depositado no fundo do curso d'água temos que usar a Tabela (82.2) onde no ribeirão dos Meninos 7,4% é a proporção de transporte do leito e o transporte sólido total.

Como o transporte sólido total é de 345.250m^3 , vamos calcular 7,4% deste valor para acharmos o material que será depositado realmente:

$345.250\text{m}^3 \times 7,4/100 = 25.548,50\text{m}^3$ por ano

Portanto, irá se depositar no ribeirão dos Meninos $25.548,50\text{m}^3$ por ano.

82.3 Pesquisas feitas pelo FCTH de São Paulo

Em termos práticos há uma capacidade ilimitada do transporte da carga de lavagem que por sua vez depende somente de fatores externos. Por esta razão, este material não contribui nas transformações morfológicas de um curso d'água, e sendo assim, a única maneira de se quantificar esta parcela é através de campanhas de medições.

Pesquisas foram feitas na Região do Alto Tietê no Estado de São Paulo por (Ramos, Helou e Brighetti, 1993) cujos resultados estão na Tabela (82.1) - Diâmetro limite para a carga de lavagem e proporção entre os transporte sólido em suspensão e o total do material do leito.

Tabela 82.1 – Diâmetro limite para carga de lavagem e proporção entre os transporte sólido em suspensão e total do material do leito

Afluente	Velocidade de atrito v^* (m/s)	Velocidade de queda do sedimento w_0 (m/s)	Diâmetro da partícula d (mm)	Relação entre a vazão de sólidos em suspensão e a vazão total de sólidos Q_{ss}/Q_{st}
Jaguareé	0,206	0,051	0,35	0,70
Pirajussara	0,187	0,047	0,32	0,65
Dreno do Brooklin	0,145	0,036	0,27	0,45
Ponte baixa	0,249	0,062	0,41	0,30
Tamanduateí	0,148	0,037	0,29	0,45
Meninos	0,208	0,052	0,38	0,75
Aricanduva	0,210	0,052	0,38	0,95
Cabuçu de cima	0,220	0,055	0,40	1,00
Baquirivu	0,250	0,062	0,41	0,30
Itaquera	0,169	0,042	0,30	0,97

Fonte: Lloret Ramos, Helou e Brighetti. Dinâmica do transporte sólido nos rios Tietê e Pinheiros na região metropolitana de São Paulo, 1993

v^* = velocidade de atrito correspondente à vazão modeladora

w_0 = velocidade de queda do sedimento de diâmetro d .

Q_{ss}/Q_{st} = é a razão entre os transportes em suspensão (leito e total).

Na continuação das pesquisas foram obtidas na Tabela (82.2) a proporção entre a capacidade de transporte do leito e o transporte sólido total em porcentagem.

Tabela 82.2 – Proporção entre a capacidade de transporte do leito e o transporte sólido total (valores em %)

Afluente	Engelund Hansen (%)	Ackers White (%)	Brownlie (%)	Graí Acaroglu (%)	Média (%)
Jaguaré	29,2	24,7	53,5	85,4	45,6
Pirajussara	7,2	19,4	47,4	4,0	19,1
Dreno de Brooklin	0,9	4,4	10,7	3,0	4,6
Ponte Baixa	2,8	0,0	15,5	39,5	13,6
Tamanduateí	7,7	47,6	75,4	2,7	33,2
Meninos	2,9	5,8	18,3	5,2	7,4
Aricanduva	1,0	2,5	5,4	3,7	2,6
Cabuçu de Cima	10,4	38,9	43,8	33,0	26,4
Baquirivu	0,7	0,0	0,9	3,5	1,2
Itaquera	1,4	4,2	4,6	3,4	2,9

Fonte: Lloret Ramos, Helou e Brightetti. Dinâmica do transporte sólido nos rios Tietê e Pinheiros na região metropolitana de São Paulo, 1993

Conforme o trabalho apresentado em 1993 por Carlos Lloret Ramos, Gisela Coelho Nascimento Helou e Luiz Eduardo de Souza Ikeda p. 252 nos Anais 5 do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos-Gramado-RS temos:

A equação de análise de transporte sólido é:

$$Q_{ss} = \alpha_1 \cdot Q^{\beta_1} \quad \text{(Equação 82.1)}$$

onde:

Q_{ss} = vazão sólida em suspensão (kg/s)

Q = vazão líquida em m^3/s

α_1 e β_1 são coeficiente de regressão

A fórmula também pode ser escrita em forma de concentração:

$$C = \alpha_2 \cdot q^{\beta_2} \quad \text{(Equação 82.2)}$$

onde:

C = concentração de sólidos (mg/l)

q = vazão específica ($m^3/s \cdot km^2$)

α_2 e β_2 são coeficientes de regressão.

Pesquisas feitas pelos autores citados acima, resultaram nas Tabelas (82.3) e Tabela (82.4) sendo a Tabela (82.3) dos coeficientes das curvas de regressão das equações de transporte sólido e a Tabela (82.4) de granulometria dos sedimentos transportados nos afluentes.

Tabela 82.3 – Coeficientes das curvas de regressão das equações de transporte sólido

Curso d'água	α_1	β_1	α_2	β_2
Jaguaré	0,020	2,88	235	1,70
Pirajussara	0,080	2,00	5012	0,90
Dreno do Brooklin	0,407	2,34	3548	1,34
Ponte Baixa	0,690	1,39	4467	0,54
Tamanduateí	0,089	1,90	708	0,90
Meninos	0,126	1,87	6918	0,85
Aricanduva	0,178	2,22	17318	1,28
Cabuçu de Cima	0,125	2,00	13804	1,00
Baquirivu	0,269	1,82	17378	0,82
Itaquera	1,120	1,74	19553	0,73

Fonte: Lloret Ramos, Helou e Ikeda. Campanhas Hidrosedimentométricas na região metropolitana de São Paulo, 1993

Para os rios Aricanduva e Cabuçu de Cima chegaram-se as seguintes conclusões:

$$\text{Aricanduva} \quad q = 1,43 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$$

$$\text{Cabuçu de Cima} \quad q = 0,56 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$$

Com os dados acima foi feita a Tabela (82.5) referente as contribuições anuais dos afluentes monitorados.

Tabela 82.4 – Granulometria dos sedimentos transportados nos afluentes

Curso d'água	Fundo		Suspensão	
	d ₅₀ (mm)	Desvio padrão σ	d ₅₀ (mm)	Desvio padrão σ
Jaguaré	0,704	2,68	0,077	2,12
Pirajussara	0,707	2,50	0,146	2,46
Água espriada	0,95	1,50	0,054	8,51
Ponte Baixa	2,92	3,98	0,037	8,51
Tamanduateí	0,81	3,07	0,058	20,8
Meninos	0,56	1,63	0,131	2,18
Aricanduva	0,415	2,52	0,062	1,29
Cabuçu de Cima	0,247	1,75	0,075	4,22
Baquirivu	3,30	4,54	0,037	2,04
Itaquera	0,24	1,63	0,076	1,72

Fonte: Lloret Ramos, Helou e Ikeda. Campanhas Hidrosedimentométricas na região metropolitana de São Paulo, 1993

Tabela 82.5 – Contribuições anuais dos afluentes monitorados

Curso d'água	Área da bacia A (km ²)	Vazão líquida ou vazão modeladora Q (m ³ /s)	Concentração sólida C (mg/L)	Vazão sólida total Qs (kg/s)	Descarga sólida anual Va (m ³)	Relação da descarga sólida com a área da bacia Va /A (m ³ /km ²)
Jaguaré	15,9	22,74	430	10	9700	609
Pirajussara	70,9	101,4	6900	700	691000	9750
Dreno do Brooklin	28,1	40,2	5700	230	227100	8075
Ponte Baixa	6,9	9,8	5420	55	526000	7640
Tamanduateí	90,0	129,0	980	130	124200	1400
Meninos	104,5	149,4	9380	1400	1381000	13300
Aricanduva	69,0	98,7	27470	2700	2671000	38700
Cabuçu de Cima	110,1	61,7	7730	480	586000	5300
Baquirivu	163,7	91,7	10800	1000	1216500	7500
Itaquera	48,42	69,2	25900	1800	1767800	36500

Fonte: Lloret Ramos, Helou e Ikeda. Campanhas Hidrosedimentométricas na região metropolitana de São Paulo, 1993

A conclusão dos estudos é válida para a região do Alto Tietê a qual se chegou a média da contribuição específica de 8570 m³/ano.km².

Exemplo 82.3 Aplicação prática no ribeirão dos Meninos (afluente do rio Tamanduateí)

A nosso ver a melhor maneira para o perfeito entendimento sobre os problemas de sedimentos, é mostrar um caso real, como por exemplo, o dimensionamento de vários pisciões no ribeirão dos Meninos afluente do rio Tamanduateí localizado na RMSP.

O exemplo prático, ilustrará as *pesquisas* bem elaboradas pela Fundação Centro Tecnológica (FCTH) e aplicação da mesma pelo DAEE de São Paulo.

Quanto ao aspecto sedimentométrico quantitativo propriamente dito, levantamentos e estudos efetuados pela FCTH nos períodos de cheia em 1990/1991 e 1991/1992 avaliaram para o ribeirão dos Meninos uma **descarga sólida anual** de 1.381.000m³.

Este valor foi obtido através de estimativas, tomando-se por base a similaridade existente entre este rio e outros com as mesmas características geomorfológicas básicas e nos quais foram feitas amostragens abrangendo séries históricas (DAEE, 1999) e que se encontra na "Tabela (82.5) -Contribuições anuais dos afluentes monitorados" que é chamado de **Va**.

Este quantitativo, que se refere a carga sólida total transportada pelo rio constitui-se, na realidade, na soma de 2 parcelas de sedimentos: a primeira, denominada "**carga de lavagem**", a qual geralmente não é encontrada nos leitos dos rios, por ser muito fina, sendo assim carregada predominantemente, em decorrência da energia atuante, em suspensão, e a segunda, a chamada "**carga sólida total do leito**", que se refere aos sedimentos que constituem os fundos dos talvegues.

Quando da passagem de ondas de cheia, porções desta última parcela poderão também vir a ser mobilizadas por suspensão, enquanto outras porções se movimentarão exclusivamente pelo fundo (por rolamento, arraste ou saltitação) (DAEE,1999).

No caso do rio Aricanduva, com base em parâmetros da energia hidráulica atuante para o transporte sólido, os referidos estudos avaliaram em 0,75 a proporção entre o transporte sólido em suspensão e o total (*Tabela 82.1 – Diâmetro limite para carga de lavagem e proporção entre os transporte sólido em suspensão e total do material do leito*), o que significa haver uma predominância (75%) do transporte sólido em suspensão sobre o transporte sólido total, do qual portanto apenas 25 % seria transportada pelo fundo (cerca de 350.000m³/ano).

Como parte desta carga sólida é também possível de ser transportada em suspensão, avaliou-se nos trabalhos mencionados que apenas cerca de 7% (*Tabela 82.2 – Proporção entre a capacidade de transporte do leito e o transporte sólido total* (valores em %)) desta última carga sólida irá ser transportada exclusivamente pelo fundo (em torno de 25.000m³/ano); esta, portanto, seria a parcela que efetivamente iria contribuir para os processos de assoreamento do leito tanto do próprio ribeirão dos Meninos, como do rio Tamanduateí e até mesmo do rio Tietê.

Os estudos referidos determinaram também que o material do leito constitui-se, granulometricamente, por sedimentos com $d_{50} = 0,56\text{mm}$ para o leito e $d_{50} = 0,131\text{mm}$ para o material em suspensão.

Granulometricamente o material do leito constitui-se de areias 'finas' e 'médias'.

A observação visual do material constituinte dos depósitos de assoreamento indica uma predominância de sedimentos finos não podendo deixar de se mencionar a ocorrência local, de materiais mais grosseiros, como cascalhos e até mesmo blocos (classes de materiais de dimensões centimétricas).

Tendo em vista tais evidências, recomenda-se que os reservatórios de detenção a serem projetados disponham de dispositivos que dificultem a entrada dos sedimentos de fundo

e do lixo, mas que permitam o encaminhamento para o seu interior dos sedimentos em suspensão carregados pelo rio, principalmente nas primeiras enxurradas.

A carga sedimentar em suspensão poderá vir a ser captada nos reservatórios mas, em função do pequeno período de residência, dificilmente se depositará nestas áreas, devendo uma grande parcela desta carga sedimentar ser carregada ainda em suspensão para o curso do rio a jusante, e ser assim transportada para o rio Tietê.

82.4 Lei de Stokes

Quando uma partícula sólida cai dentro de um líquido segue o que se chama da Lei de Stokes, que assume o seguinte:

- (1) as partículas não são influenciadas por outras partículas ou pela parede dos canais e reservatórios;
- (2) as partículas são esféricas
- (3) a viscosidade da água e a gravidade específica do solo são exatamente conhecidas.

Mesmo não obedecendo as duas primeiras precisamente, é usado a Lei de Stokes, que também deve ser aplicada a esferas que tenham diâmetro entre 0,0002mm e 0,2mm (McCuen,1998).

A velocidade (uniforme) da queda de esferas ou seja a velocidade de deposição (velocidade de queda) da *Lei de Stokes* é a seguinte:

$$V = [D^2 (\gamma_s - \gamma)] / 18 \cdot \mu \quad \text{(Equação 82.3)}$$

sendo

V= velocidade de deposição (m/s);

D= diâmetro equivalente da esfera (partícula)

γ = peso específico da água a 20° C = 9792,34 N/m³ (Lencastre,1983 p. 434)

$\gamma_s / \gamma = 2,65$ (densidade relativa do quartzo em relação a água)

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

μ = viscosidade dinâmica da água a 20° C = 0,00101 N. s /m² (Lencastre,1983)

ρ = massa específica a 20° C = 998,2 kg/m³ (Lencastre,1983)

ν = viscosidade cinemática da água a 20° C= 0,00000101 m²/s (Lencastre,1983)

O diâmetro equivalente D da partícula é o diâmetro da esfera que se sedimenta com velocidade igual à da partícula.

Para maiores informações sobre a Lei de Stokes, verificar (McCuen,1998 p.758) e (Quintela, 1981 p.173).

A fórmula apresentada acima de Lei de Stokes é aproximada e vale somente para baixos números de Reynolds e no caso deve ser menor que 5 (cinco). (McCuen,1998) também admitiu que o diâmetro das esferas devem estar entre 0,0002mm e 0,2mm. Tudo isto é perfeitamente compreensível quando se examina os dados experimentais obtidos por Rouse em 1937 e apresentado por (Quintela, 1981).

(Quintela,1981) mostra que para número de Reynolds menor que 0,1 é válida a lei Stokes da seguinte maneira:

$$R = V \cdot D / \nu < 0,1 \quad \text{(Equação 82.4)}$$

$$V = [g \cdot D^2 (\gamma_s - \gamma)] / 18 \cdot \mu \cdot \gamma \quad \text{(Equação 82.5)}$$

Observar que no numerador aparece g e no denominador γ .

(Quintela, 1981 p.173) diz que para $R=0,1$ e temperatura da água a 20°C corresponde ao diâmetro de $0,05\text{mm}$ e velocidade uniforme de queda das esferas ou seja a velocidade de deposição $V=2\text{mm/s}$.

82.5 Granulometria dos sedimentos

A densidade do sedimento depende da sua composição mineralógica. Por outro lado, uma grande quantidade de estudos demonstra haver uma estreita relação entre a dimensão do sedimento e sua composição mineral (Lloret, 1984). Assim sendo, os materiais mais grosseiros são constituídos de materiais mais resistentes aos desgastes mecânicos, como o quartzo. À medida que a granulometria diminui há uma redução da quantidade de quartzo e um aumento na quantidade de materiais menos resistentes, como a caulinita. De maneira geral, a composição mineralógica das areias dos cursos de água encontradas na natureza, tem um predomínio de quartzo, com peso específico muito pouco variável, entre 2600kg/m^3 e 2700kg/m^3 . Na prática adotam-se os seguintes valores para os cursos de água naturais (Lloret, 1984):

$$\gamma_s = 2.650\text{kg/m}^3 \text{ (peso específico seco)}$$

$$\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3 \text{ (peso específico submerso)}$$

Para o reconhecimento do tamanho dos grãos de um solo, realiza-se a análise granulométrica, que consiste, em geral, de duas fases: peneiramento e sedimentação (Souza Pinto, 2000).

O peso do material que passa em cada peneira, referido ao peso seco da amostra, é considerado como a “porcentagem que passa” representado graficamente em função da abertura da peneira, esta em escala logarítmica (Souza Pinto, 2000). A abertura nominal da peneira é considerada como o “diâmetro” das partículas. Trata-se, evidentemente de um “diâmetro equivalente”, pois as partículas não são esféricas.

A análise por peneiramento tem como limitação a abertura da malha das peneiras, que não pode ser tão pequena quanto o diâmetro de interesse. A menor peneira costumeiramente empregada é a de n.º 200, cuja abertura é de $0,075\text{mm}$. Existem peneiras mais finas para estudos especiais, mas são pouco resistentes e por isso não são usadas rotineiramente (Souza Pinto, 2000).

Quando há interesse no conhecimento de distribuição granulométrica da porção mais fina dos solos, emprega-se a técnica da sedimentação, que se baseia na Lei de Stokes.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) adota para classificação das partículas a Tabela (82.6).

Tabela 82.6- Limite das frações de solo pelo tamanho dos grãos

Fração	Limites definidos pela norma da ABNT
Matacão	de 25cm a 1m
Pedra	de 7,6cm a 25cm
Pedregulho	de 4,8mm a 7,6cm
Areia grossa	de 2mm a 4,8mm
Areia média	de 0,42mm a 2mm
Areia fina	de 0,05mm a 0,42mm
Silte	de 0,005mm a 0,05mm
Argila	inferior a 0,005mm

Fonte: Souza Pinto, 2000 p. 4

(Souza Pinto, 2000) diz que na prática diferentemente da norma da ABNT a separação entre areia e silte é tomada como 0,075mm, devido a peneira n.º 200, que é a mais fina usada em laboratórios. Considera-se argila quando o diâmetro das partículas é menor que 0,002mm.

Argila: $d < 0,002\text{mm}$ (Souza Pinto, 2000)

Silte $0,002\text{mm} \leq d \leq 0,075\text{mm}$ (Souza Pinto, 2000)

Areia $0,075 \leq d \leq 2\text{mm}$ (Souza Pinto, 2000)

As partículas podem ser classificadas com base no diâmetro médio da mesma em milímetros (McCuen, 1998).

Argila: $d < 0,002\text{mm}$ (McCuen, 1998).

Silte $0,002\text{mm} \leq d \leq 0,02\text{mm}$ (McCuen, 1998).

Areia $0,02 \leq d \leq 2\text{mm}$ (McCuen, 1998).

Conforme o *U.S. System for Texture Designations* citado por McCuen, 1998 p. 115, os limites dos diâmetros estão na Tabela (82.7).

Tabela 82.7- Tamanho das partículas conforme o tipo de solo

Tipo de solo	Diâmetro das partículas (mm)
Areia muito grossa	1,0 a 2,00
Areia grossa	0,50 a 1,00
Areia média	0,25 a 0,50
Areia fina	0,10 a 0,25
Areia muito fina	0,05 a 0,10
Silte	0,002 a 0,05
Argila	Abaixo de 0,002

Fonte: McCuen, 1998, p. 115

A composição dos sedimentos constituintes do fundo é, geralmente, caracterizada pela curva granulométrica, que exprime, uma função de uma dimensão dos sedimentos designada por diâmetro, a porcentagem, em peso, dos sedimentos que numa dada amostra apresentam dimensões inferiores àquela (Quintela, 1981 p.374).

Assim d_{50} representa o diâmetro dos sedimentos para o qual os elementos com diâmetro inferiores perfazem 50% do peso da amostra.

A Tabela (82.4) apresenta a granulometria de vários córregos e rios da região do Alto Tietê em São Paulo. Na Tabela (82.8) estão o diâmetro d_{50} o respectivo desvio padrão, tanto para os materiais do fundo e dos materiais em suspensão. O que nos interessa para a sedimentação em reservatórios de detenção é a granulometria dos materiais em suspensão.

Tabela 82.8- Granulometria de diversos cursos d'água do Alto Tietê -São Paulo

Curso d'água	Granulometria dos sedimentos em suspensão d_{50} (mm)
Jaguareé	0,077
Pirajussara	0,146
Água espreiada	0,054
Ponte Baixa	0,037
Tamanduateí	0,058
Meninos	0,131
Aricanduva	0,062
Cabuçu de Cima	0,075
Baquirivu	0,037
Itaquera	0,076

Fonte: Lloret Ramos, Helou e Ikeda. Campanhas Hidrosedimentométricas na região metropolitana de São Paulo, 1993

Observar que todos os valores de d_{50} da Tabela (82.8) estão compreendidos entre a faixa dos diâmetros das esferas citados por (McCuen,1998), que é $0,0002\text{mm} \leq d_{50} \leq 0,02\text{mm}$ e portanto, pode ser aplicada a Lei de Stokes, devendo somente ser verificado que o número de Reynolds deve ser menor que 5, pelas aproximações feitas por (McCuen,1998).

Exemplo 82.4- Verificação de sedimentação em um reservatório

Um reservatório de detenção para controle de inundações tem um volume de 74.000m^3 , é enterrado na forma de um paralelepípedo com 178,00m de comprimento, 77,00m de largura e profundidade útil de 5,50m. A partícula sólida tem diâmetro de 0,075mm conforme pesquisas efetuadas na região. A vazão de projeto de saída do reservatório é de $13,00\text{m}^3/\text{s}$.

O tempo de deslocamento T_t da água dentro do reservatório é aproximadamente o volume do reservatório V_0 dividido pela vazão de saída Q .

$$T_t = V_0/Q = 74000\text{m}^3 / 13,00\text{m}^3/\text{s} = 5692 \text{ s} = 1,58 \text{ h}$$

A velocidade média da água através do reservatório é a vazão $Q=13,00\text{m}^3/\text{s}$ dividido pelo produto da largura media $W=77,00\text{m}$ e a profundidade média $H=5,60\text{m}$.

$$V = Q/ (W \cdot H) = 13,00 / (77,00 \cdot 5,60) = 0,030\text{m/s}$$

Considerando que a partícula do sólido tenha $d_{50} = 0,075\text{mm}$ ou seja uma areia muito fina, comum em São Paulo no Rio Cabuçu de Cima , que limita o município de São Paulo com o município de Guarulhos.

Vamos calcular o número de Reynolds

$$R = V \cdot D/ \nu = 0,030\text{m/s} \cdot (0,075\text{mm}/1000) / 0,00000101 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 2,24 < 5$$

Portanto o número de Reynolds =2,24 que é menor que 5 e portanto, aplica-se a Lei de Stokes, conforme (McCuen, 1998 p.799).

A velocidade (uniforme) de deposição das esferas segundo a Lei de Stoke é:

$$V = [D^2 (\gamma_s - \gamma)] / 18 \cdot \mu$$

$$V = [(0,075/1000)^2 (25949,701 - 9792,34)] / 18 \cdot 0,00101 = 0,004999183\text{m/s}$$

No comprimento de 177m a partícula sólida se decantará a partir de:
Profundidade limite = tempo de deslocamento pelo reservatório . velocidade de deposição
Profundidade limite= 5692 s . 0,00499183m/s = 28,46m

Portanto, a eficiência será de 100%, pois tudo será depositado;

Exemplo 82.5- Verificação de sedimentação em um reservatório (McCuen,1998 p.799)

Um reservatório de detenção para controle de inundações tem um volume de 3679m³, é enterrado na forma de um paralelepípedo com 114,38m de comprimento, 30,5m de largura e profundidade útil de 1,07m. A partícula sólida tem diâmetro de 0,00001525m (0,01525mm) conforme pesquisas efetuadas na região. A vazão de projeto de saída do reservatório é de 0,91 m³/s.

O tempo de deslocamento T_t da água dentro do reservatório é aproximadamente o volume do reservatório V₀ dividido pela vazão de saída Q.

$$T_t = V_0/Q = 3679 \text{ m}^3 / 0,91 \text{ m}^3/\text{s} = 4043 \text{ s} = 1,12\text{h}$$

A velocidade média da água através do reservatório é a vazão Q=0,91 m³/s dividido pelo produto da largura média W=30,5m e a profundidade média H=1,07m.

$$V = Q / (W \cdot H) = 0,91 / (30,5 \cdot 1,07) = 0,028 \text{ m/s}$$

Considerando que a partícula do sólido tenha d₅₀ =0,01525mm ou seja uma areia muito fina.

Vamos calcular o número de *Reynolds* desprezando a componente vertical da velocidade.

$$R = V \cdot D / \nu = 0,028\text{m/s} \cdot (0,01525\text{mm}/1000) / 0,00000101 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 0,42 < 5$$

Portanto o número de Reynolds =0,42 que é menor que 5 e portanto, aplica-se a Lei de Stoke.

A velocidade (uniforme) de deposição das esferas segundo a Lei de Stokes é:

$$V = [D^2 (\gamma_s - \gamma)] / 18 \cdot \mu$$

$$V = [(0,01525/1000)^2 (25949,701 - 9792,34)] / 18 \cdot 0,00101 = 0,000206688\text{m/s}$$

No comprimento de 114,38m a partícula sólida se decantará a partir de:

Profundidade limite = tempo de deslocamento pelo reservatório . velocidade de deposição

Profundidade limite = $4043s \cdot 0,000206688m/s = 0,84m$

Portanto, a deposição será feita somente a partir de 0,84m de profundidade. Como o reservatório tem somente 1,07m de profundidade

A eficiência do reservatório será: $0,84m / 1,07m = 0,7809 = 78,09\%$

Portanto 78,09% da água não será depositado. Somente será depositado no reservatório a diferença $100-78,09 = 21,91\%$.

82.6 Estimativa do tempo de esvaziamento de um reservatório (McCuen,1988 in Tucci,1995)

A estimativa do tempo de detenção de um reservatório é dado pela seguinte fórmula:

$$T_d = 0,2112 \cdot K^{-1,284} \cdot (V_s / V_r)^{0,4421} \cdot (q_0 / q_i)^{-0,8963} \quad \text{(Equação 82.6)}$$

Onde:

T_d = é o tempo de detenção em (h);

V_s = volume do reservatório em (m^3);

q_i = vazão de pico da hidrógrafa de entrada (m^3/s)

q_0 = vazão de pico da hidrógrafa de saída (m^3/s);

K = proporção do volume do trecho de subida da hidrógrafa de entrada. K varia de 0 a 1.

V_r = volume da hidrógrafa de saída (m^3).

Exemplo 82.3- Estimativa do tempo de esvaziamento de um reservatório de detenção conforme (McCuen,1988 in Tucci,1995)

Seja um reservatório de detenção com volume de $74.000m^3$. A vazão máxima de saída do reservatório é de $13m^3/s$ e a vazão máxima da hidrógrafa de entrada, obtida pelo Método Santa Barbara é de $42,3m^3/s$.

O valor de K é a proporção entre o volume do trecho de subida do hidrograma de entrada com relação ao volume total.

Usando-se os intervalos de tempo em que foi feita a hidrógrafa de entrada obtém-se a vazão total de $141.714,4m^3$ e pelo mesmo procedimento calculamos o volume até o pico de $42,3m^3/s$ o obteremos o valor de $53.039,71m^3$.

O valor de k será divisão de $53.039,71$ por valor total de $141.714,4 m^3$ e será igual a $0,374272$.

$$V_s = 74.000m^3$$

$$q_i = 42,3m^3/s$$

$$q_0 = 13,0m^3/s$$

$$K = 53039,71 m^3 / 141.714,4 m^3 = 0,374272$$

$$V_r = 141.714,4 m^3$$

Aplicando-se a fórmula de (McCuen,1988) teremos:

$$T_d = 0,2112 \cdot K^{-1,284} \cdot (V_s / V_r)^{0,4421} \cdot (q_0 / q_i)^{-0,8963}$$

$$T_d = 0,2112 \cdot 0,374272^{-1,284} \cdot (74000/141.714,44)^{0,4421} \cdot (13,0/42,3)^{-0,8963}$$

$$T_d = 1,6h$$

Portanto o tempo em que as águas de chuvas ficam detidas no reservatório é de 1,6h, o que é um tempo muito pequeno.

82.7 Reserva de sedimentação em um reservatório de detenção

82.7.1. Illinois, USA

No estado de Illinois nos Estados Unidos para o reservatórios de detenção secos, deve ser reservado para sedimentação no *mínimo* 35,4m³/ha da área impermeável.

Exemplo 82.4

Seja uma bacia com 222ha, sendo que a área impermeável é de 55%. Calcular o volume que deve ser reservado para sedimentação.

Usando a taxa de 35,4m³/ha da área impermeável temos:

$$222ha \times 0,55 \times 35,4 \text{ m}^3/ha = 4.322\text{m}^3$$

Portanto, deverá ser reservado para sedimentação 4.322m³, que deverá ser acrescido do volume necessário para detenção conforme os cálculos hidrológicos e hidráulicos.

82.7.2 Estado de Carolina do Norte, USA

No estado da Carolina do Norte nos Estados Unidos foram pesquisados 20 reservatórios de detenção construídos para controle de enchentes. A maioria dos reservatórios tem de 32anos a 45anos (data base de fevereiro de 1998).

A vida útil dos reservatórios estimado foi de 50anos. O acúmulo de sedimentos finos granulares verificado foi de 6,5ton/ha/ano.

Considerando o peso específico aparente de 1185 kg/m³ para sedimentos finos com diâmetro médio de 0,05mm (Lloret,1984 p.30), transformamos 6,5ton/ha/ano em 5,49m³/ha/ano.

Portanto, deverá ser reservado para depósito de sedimentos em reservatórios de detenção, na Carolina do Norte, cerca de 5,49m³/ha/ano.

Exemplo 82.5

Calcular o volume de reserva para sedimentação para dois anos de funcionamento do reservatório de detenção de 74.000m^3 com área de drenagem de 222ha.

Teremos:

$$222\text{ha} \times 5,49\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano} \times 2 \text{ anos} = 2.438\text{m}^3$$

Portanto, deverá ser acrescido ao volume do reservatório de detenção de 74000m^3 mais 2438m^3 para ser feito a limpeza mecânica, manual ou dragagem após 2 anos de funcionamento.

82.7.3 Resíduos sólidos

Na região metropolitana de São Paulo (RMSP) o lixo estimado é de *1kg/pessoa/dia*.

O grande problema são as subhabitações. Com o sistema deficiente de coleta de lixo, os moradores que moram a beira dos rios, córregos e fundos de vales, lançam os resíduos sólidos aos mesmos, sendo que estes são encaminhados aos rios contribuindo enormemente para o assoreamento. Para piorar os entulhos são também muitas vezes levados pela água e muitas vezes lançados nos cursos d'água.

Considerando que as cidades da RMSP têm em *média 13% de subhabitações* e considerando 100hab/ha, podemos ver a enorme área ocupada pelas mesmas.

Vamos supor que uma área de 5ha de subhabitações jogam o seu lixo no córrego próximo. Teremos: $5\text{ha} \times 100\text{hab}/\text{ha} = 500\text{hab}$

$$500\text{hab} \times 1 \text{ kg}/\text{hab} = 500\text{kg}/\text{dia} = 0,5\text{ton}/\text{dia}$$

Durante um ano teremos: $0,5\text{ton}/\text{dia} \times 365\text{dias} = 183\text{ton}/\text{ano}$ o que dará o *índice de 37ton de lixo/ano/ha*.

A solução é através de *medidas não estruturais* visando a coleta dos resíduos sólidos juntamente com um programa de educação ambiental.

A média de coleta de lixo nas cidades de Diadema, Santo André, São Bernardo, São Caetano e bairro do Ipiranga e bairro do Jabaquara em São Paulo é de 98,18% ou seja o restante 1,82% não é coletado.

Em uma área de 222ha, por exemplo, com 100hab/ha teremos 22.200hab. Como não é coletado 1,82% isto é, 404hab e sendo de 1kg/hab/dia teremos 147 toneladas de lixo por ano. Isto sem considerar as subhabitações.

Portanto a contribuição média anual de resíduos sólidos em local sem subhabitações é de 0,7ton/ha/ano.

82.8 Conclusão

O tempo de esvaziamento de um reservatório de detenção em média é menor que 6h (Tucci,1995), não havendo portanto grandes problemas de sedimentação.

Há necessidade de estudar o transporte de sedimentos e de lixo.

Deverá ser previsto a manutenção manual ou com equipamentos para o caso de retirada de materiais depositados e de lixo que é jogado pelas moradores das subhabitações.