

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CARACTERIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE  
SEDIMENTOS EM UM PEQUENO RIO URBANO NA  
CIDADE DE SANTA MARIA – RS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Juliana Scapin**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2005**

**CARACTERIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS  
EM UM PEQUENO RIO URBANO NA CIDADE DE SANTA  
MARIA – RS**

**por**

**Juliana Scapin**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,  
Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental,  
da Universidade Federal de Santa Maria  
(UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2005**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM UM  
PEQUENO RIO URBANO NA CIDADE DE SANTA MARIA – RS**

elaborada por  
**Juliana Scapin**

como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**João Batista Dias de Paiva (CT/UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Maria do Carmo Cauduro Gastaldini (CT/UFSM)**

---

**Carlos Lloret Ramos (CTH/USP)**

Santa Maria, 24 de Fevereiro de 2005.

## DEDICATÓRIA

Ao meu pai, João Carlos  
Scapin, que está sempre presente  
em minha memória  
e no meu coração, dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus...

A minha mãe, Lourdes Scapin, minha irmã, Carla Scapin, pelo carinho, preocupação e incentivo;

Ao meu namorado, Anderson Batista, pela compreensão;

Ao professor João Batista Dias de Paiva, pela oportunidade e orientação;

A professora Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva;

Aos bolsistas de iniciação científica Talita Uzeika, Inocencio Sobroza e Rodrigo Paiva, pelo auxílio no campo, no laboratório e pela amizade;

Aos colegas, Joaquin Bonnacarrère, Ana Paula Brites, Lidiane Bittencourt e Cíntia Dotto;

Aos funcionários Alcides Sartori, Astério do Carmo e Eliomar Pappis;

Ao Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT/CT – HIDRO através do projeto CTHidro/GURH: FINEP 03/2002;

Ao professor Carlos Ernando da Silva pela orientação no Laboratório;

Aos profissionais do Laboratório de Engenharia Civil da Companhia Energética de São Paulo (CESP) pelo auxílio na realização dos ensaios sedimentométricos;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa de estudos.

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### **CARACTERIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM PEQUENO RIO URBANO NA CIDADE DE SANTA MARIA – RS**

Autora: Juliana Scapin

Orientador: João Batista Dias de Paiva

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 24 de fevereiro de 2005.

Este trabalho apresenta resultados da avaliação do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria, RS. Foram realizados trabalhos de medição de descargas líquidas e sólidas e coletado material de leito durante treze eventos chuvosos, entre Dezembro de 2003 e Novembro de 2004. Os trabalhos de laboratório consistiram em análises granulométricas e concentrações de sedimentos. Os dados obtidos foram utilizados para avaliar a eficiência dos métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955), Colby (1957), Engelund e Hansen (1967), Yang (1973), Ackers e White (1973), Van Rijn (1984), Karim (1998) e Cheng (2002), para estimar a descarga sólida na seção de medição considerada.

Os dois métodos que incorporam dados medidos de concentração de sedimentos em suspensão, Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) e Colby (1957), obtiveram os melhores resultados, com relações entre a descarga calculada e a descarga medida de 1,01 e 1,33 e índices de dispersão de 0,11 e 0,44, respectivamente. Dos métodos da estimativa indireta da descarga total de sedimentos, o método de Yang foi o que apresentou os melhores resultados com a relação entre a descarga calculada e a descarga medida de 1,41 e índice de dispersão de 2,23. Os métodos de Karim (1998) e Ackers e White (1973) apresentaram bons resultados, com as relações entre as descargas calculadas e as descargas medidas de 0,65 e 0,59 e índices de dispersão de 3,06 e 3,20, respectivamente. O método de Van Rijn (1984) apresentou relação entre a descarga calculada e a descarga medida de 3,53 e índice de dispersão de 9,37. Os piores resultados foram apresentados pelos métodos de Engelund e Hansen (1967) e pelo método de Cheng (2002), com relações entre a descarga calculada e a descarga medida de 4,35 e 24,22 e índices de dispersão de 15,38 e 562,26, respectivamente.

## **ABSTRACT**

M.Sc. Dissertation  
Post Graduation Program in Civil Engineering  
Universidade Federal de Santa Maria

### **SEDIMENT TRANSPORT CHARACTERIZATION IN A SMALL URBAN STREAM IN SANTA MARIA-RS**

Author: Juliana Scapin  
Adviser: João Batista Dias de Paiva  
Local and date: Santa Maria, February 24<sup>th</sup>, 2005.

This paper presents the results of the sediment transport assessment in a small urban stream in Santa Maria city, RS. Liquid and solids discharges were measured and the bed material was collected during thirteen raining events, between December 2003 and November 2004. The laboratory tasks included the particle size analyses and the sediment concentration. The obtained data were used to evaluate the efficiency of the following methods: Einstein Modified by Colby and Hembree (1955), Colby (1957), Engelund and Hansen (1967), Yang (1973), Ackers and White (1973), Van Rijn (1984), Karim (1998) and Cheng (2002). It was done to estimate the solid discharge at the considered measurement section.

Einstein Modified by Colby and Hembree (1955) and Colby (1957) are the methods that include measured data of the suspended sediment concentration and are the ones that presented the best results, they presented ratios between the calculated and measured discharge of 1.01 and 1.33 and dispersion index of 0.11 and 0.44, respectively. Considering the total sediment discharges indirect estimative methods, Yang was the one that presented the best results with ratios between the calculated and measured discharges of 1.41 and dispersion index of 2.23. Karim (1998) and Ackers and White (1973) presented satisfactory results, with ratios between the calculated and measured discharges of 0.65 and 0.59 and dispersion indexes of 3.06 and 3.20, respectively. Van Rijn (1984) method presented a ratio between the calculated and measured discharge of 3.53 and dispersion index of 9.37. The worst results were presented by Engelund and Hansen (1967) and Cheng (2002) methods with ratios between the calculated and measured discharges of 4.35 and 24.22 and dispersion indexes of 15.38 and 562.26, respectively.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fator de correção da distribuição logarítmica da velocidade segundo Einstein (1950). Fonte: Paiva (2001).....	26
Figura 2.2 – Ábaco da função de carga do fundo segundo Einstein (1950). Fonte: Paiva (2001).....	27
Figura 2.3 - Valores de $I_1$ , em termos de $E_1$ , para vários valores de $z$ segundo Einstein (1950). Fonte: Paiva (2001).....	28
Figura 2.4 - Valores de $I_2$ , em termos de $E_1$ , para vários valores de $Z$ segundo Einstein (1950). Fonte: Paiva (2001).....	29
Figura 2.5 - Valores de $Z'$ em função de $Q's / if.Qf$ , para o grão dominante segundo Colby e Hubel (1964). Fonte: Paiva (2001).....	30
Figura 2.6a - Integral de $J_1$ em termos de $E_1$ e $Z'$ segundo Colby e Hembree (1955). Fonte: Paiva (2001).....	31
Figura 2.6b - Integral de $J_1$ em termos de $E_1$ e $Z'$ segundo Colby e Hembree (1955). Fonte: Paiva (2001).....	32
Figura 2.7a - Integral de $j_2$ em termos de $E_1$ e $z'$ segundo Colby e Hembree (1955). Fonte: Paiva (2001).....	33
Figura 2.7b - Integral de $j_2$ em termos de $E_1$ e $z'$ segundo Colby e Hembree (1955). Fonte: Paiva (2001).....	34
Figura 2.8 - Ábaco para obtenção da descarga sólida não medida por metro de largura do rio a partir da velocidade média. Fonte: Paiva (2001).....	38
Figura 3.1 - Localização da Bacia do Cancela. ....	59
Figura 3.2 - Estação fluviométrica do Arroio Cancela. ....	59
Figura 3.3 - Estação fluviométrica do Arroio Cancela mostrando o transbordamento da calha.....	60
Figura 3.4 - Limnógrafo eletrônico de pressão com datalogger. ....	60
Figura 3.5 - Molinete Fluviométrico Universal. ....	61
Figura 3.6 - Sensor de velocidades.....	62
Figura 3.7 - Distribuição da velocidade da corrente, concentração de sedimentos e da descarga. Fonte: Carvalho (2000).....	63
Figura 3.8 - Amostrador USDH-48 (AMS-1).....	64
Figura 3.9 - Amostrador Helley Smith. ....	65



Figura 3.10 - Amostrador US-BMH-53 modificado em operação. ....	65
Figura 3.11 - Série de Peneiras em processo de pesagem. ....	66
Figura 3.12 - Ensaio do Tubo de Retirada pelo Fundo.....	67
Figura 3.14 - Ensaio de filtração.....	69
Figura 4.1 – Variação da declividade da linha d’água com a vazão.....	73
Figura 4.2 - Curva Granulométrica por peneiramento e sedimentação do material do leito do Arroio Cancela referente ao dia 13/11/2003. ....	75
Figura 4.3 - Curva de regressão entre a vazão (m <sup>3</sup> /s) e a profundidade hidráulica (m) do escoamento.....	78
Figura 4.4 - Curva de regressão entre a concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) e a vazão (m <sup>3</sup> /s).....	78
Figura 4.5 - Curva de regressão entre descarga de sedimentos em suspensão (ton/dia) e a vazão (m <sup>3</sup> /s). ....	79
Figura 4.6 - Curva de regressão entre descarga de sedimentos em suspensão (ton/dia) e a velocidade do escoamento (m/s). ....	79
Figura 4.7 - Curva de regressão entre descarga de sedimentos em suspensão (ton/dia) e a profundidade hidráulica do escoamento (m). ....	80
Figura 4.8 - Curva de regressão entre descarga de sedimentos em suspensão (ton/dia) e a tensão média de cisalhamento no leito (kgf/m <sup>2</sup> ).....	80
Figura 4.9 - Curva de regressão entre descarga de sedimentos em suspensão (ton/dia) e a potência do escoamento (kgf/m.s). ....	80
Figura 4.10 - Curva de regressão entre descarga de sedimentos de arraste de fundo (ton/dia) e a vazão (m <sup>3</sup> /s). ....	82
Figura 4.11 - Curva de regressão entre descarga de sedimentos de arraste de fundo (ton/dia) e a velocidade do escoamento (m/s). ....	82
Figura 4.12 - Curva de regressão entre descarga de sedimentos de arraste de fundo (ton/dia) e a profundidade hidráulica do escoamento (m). ....	82
Figura 4.13 - Curva de regressão entre descarga de sedimentos de arraste de fundo (ton/dia) e a tensão média de cisalhamento no leito (kgf/m <sup>2</sup> ).....	83
Figura 4.14 - Curva de regressão entre descarga de sedimentos de arraste de fundo (ton/dia) e a potência do escoamento (kgf/m.s). ....	83
Figura 4.15 - Curva de regressão entre descarga total de sedimentos (ton/dia) e a vazão (m <sup>3</sup> /s). ....	84

Figura 4.16 - Curva de regressão entre descarga total de sedimentos (ton/dia) e a velocidade do escoamento (m/s). .....	85
Figura 4.17 - Curva de regressão entre descarga total de sedimentos (ton/dia) e a profundidade hidráulica do escoamento (m). .....	85
Figura 4.18 - Curva de regressão entre descarga total de sedimentos (ton/dia) e a tensão média de cisalhamento no leito (kgf/m <sup>2</sup> ). .....	86
Figura 4.19 - Curva de regressão entre descarga total de sedimentos (ton/dia) e a potência do escoamento (kgf/m.s). .....	86
Figura 4.20 - Gráfico da variação da razão (r) para o Método de Einstein Modificado (1955) com a vazão por unidade de largura do canal (Q/B). .....	90
Figura 4.21 - Gráfico da variação da razão (r) para o Método de Colby (1957) com a vazão por unidade de largura do canal (Q/B). .....	91
Figura 4.22 - Gráfico da variação da razão (r) para o Método de Engelund e Hansen (1967) com a vazão por unidade de largura do canal (Q/B). .....	91
Figura 4.23 - Gráfico da variação da razão (r) para o Método de Yang (1973) com a vazão por unidade de largura do canal (Q/B). .....	91
Figura 4.24 - Gráfico da variação da razão (r) para o Método de Ackers e White (1973) com a vazão por unidade de largura do canal (Q/B). .....	92
Figura 4.25 - Gráfico da variação da razão (r) para o Método de Van Rijn (1984) com a vazão por unidade de largura do canal (Q/B). .....	92
Figura 4.26 - Gráfico da variação da razão (r) para o Método de Karim (1998) com a vazão por unidade de largura do canal (Q/B). .....	92
Figura 4.27 - Gráfico da variação da razão (r) para o Método de Cheng (2002) com a vazão por unidade de largura do canal (Q/B). .....	93
Figura 4.28 - Gráfico comparativo dos valores de ID calculados com os valores de ID apresentados por Aguirre-Pe. ....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores de A e B para Cr em função da profundidade média. ....	36
Tabela 4.1 - Características hidráulicas e geométricas da seção transversal para o Arroio Cancela. ....	72
Tabela 4.2 - Distribuição granulométrica do material do leito do Arroio Cancela referente ao dia 13/11/2003. ....	74
Tabela 4.3 - Diâmetros característicos médios do material do leito do Arroio Cancela referente ao dia 13/11/2003. ....	75
Tabela 4.4 - Valores de descargas e concentrações medidas. ....	76
Tabela 4.5 - Valores de raio hidráulico, declividade, tensão de cisalhamento, velocidade e potência.....	77
Tabela 4.6 - Coeficientes da equação de regressão (a e b) e coeficientes de correlação ( $R^2$ ), entre a descarga de sedimentos em suspensão e as demais grandezas características do escoamento. ....	81
Tabela 4.7 - Coeficientes da equação de regressão (a e b) e coeficientes de correlação ( $R^2$ ), entre a descarga de sedimentos de arraste de fundo e as demais grandezas características do escoamento. ....	84
Tabela 4.8 - Coeficientes da equação de regressão (a e b) e coeficientes de correlação ( $R^2$ ), entre a descarga total de sedimentos e as demais grandezas características do escoamento.....	87
Tabela 4.9 - Resultados das descargas medidas e calculadas.....	89
Tabela 4.10 - Relação entre a vazão por unidade de largura do canal (Q/B) e a razão (r) entre os valores da descarga de sedimentos total calculados e os medidos.	90
Tabela 4.11 - Índice de dispersão (ID) para quantificar a estimativa de sedimentos de um rio ou canal, proporcional a dispersão experimental. ....	93
Tabela 4.12 – ID (índice de dispersão) calculados e ID apresentados por Aguirre-Pe. ....	95

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	área da seção transversal ao escoamento e valor do número de Froude em movimento inicial no método de Ackers e White (1973);
a	nível de referência abaixo do qual o transporte é considerado de fundo;
B	largura da seção;
C	concentração em peso por unidade de volume;
C'	coeficiente de Chézy;
CA	coeficiente da função de transporte de sedimento no método de Ackers e White (1973);
Ca	concentração de referência;
CESP	Companhia Energética de São Paulo
Cr	concentração relativa em ppm no método de Colby (1957);
C's	concentração de sedimentos em suspensão medida em ppm no método de Colby (1957);
CT	concentração no método de Yang (1973);
D	diâmetro médio de uma faixa de diâmetros;
d	profundidade do escoamento;
D*	diâmetro adimensional da partícula, no método de Van Rijn (1984);
D16	diâmetro da partícula para o qual 16% do material do leito são mais finos;
D35	diâmetro da partícula para o qual 35% do material do leito são mais finos;
D50	diâmetro da partícula para o qual 50% do material do leito são mais finos;
D65	diâmetro da partícula para o qual 65% do material do leito são mais finos;
D84	diâmetro da partícula para o qual 84% do material do leito são mais finos;
D90	diâmetro da partícula para o qual 90% do material do leito são mais finos;
Dgr	diâmetro adimensional da partícula, no método de Ackers e White (1973);

Dm	diâmetro médio do material de fundo;
Ds	diâmetro das partículas em suspensão no método de Van Rijn (1984);
e	razão de eficiência no método de Colby (1957);
f	fator de atrito;
F	fator de correção da carga de sedimento em suspensão no método de Van Rijn (1984);
fb	fator de atrito relativo ao fundo;
Fgr	mobilidade da partícula, no método de Ackers e White (1973);
fw	fator de atrito relativo às paredes;
g	aceleração da gravidade;
Ggr	descarga sólida adimensional no método de Ackers e White (1973);
gs	descarga sólida total no método de Engelund e Hansen (1967) em kgf/m.s;
ID	índice de dispersão
K	constante de Von Kármán e fator de correção no método de Colby (1957);
Ks	altura da rugosidade equivalente de NIKURADSE;
LASED	Laboratório de Sedimentos
LCEC	Laboratório CESP de Engenharia Civil
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
m	expoente da função de transporte de sedimento no método de Ackers e White (1973);
n	expoente de transição que depende da granulometria do sedimento o método de Ackers e White (1973);
P	perímetro da seção;
Pot	potência de escoamento
Q	descarga líquida da seção;
Qb	descarga de fundo no método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955);
qb	descarga de fundo em m <sup>3</sup> /s.m no método de Van Rijn e descarga total de sedimentos por unidade de largura no método de Cheng (2002);
Qf	descarga de sedimentos de fundo;
Qm	descarga total de sedimentos medida;
Qnm	descarga sólida não amostrada no método de Colby (1957);

Qs	descarga de sedimentos em suspensão;
Qsm	descarga sólida medida no método de Colby (1957);
Qst	descarga sólida total no método de Colby (1957);
Qt	descarga total de sedimentos (ton/dia);
r	relação entre a descarga total de sedimentos calculada e medida;
Rb	raio hidráulico relativo ao fundo (m);
Rey	parâmetro adimensional dado pela relação entre a força de inércia e a força viscosa;
Reyb	número de Reynolds relativo ao fundo;
Reyw	número de Reynolds relativo às paredes;
Rh	raio hidráulico da seção;
Rw	raio hidráulico relativo às paredes;
S	declividade da linha d'água;
s	densidade do sedimento;
T	parâmetro de transporte que expressa a mobilidade da partícula no método de Van Rijn (1984);
U	velocidade média do escoamento;
u*	velocidade de atrito da corrente;
U*	velocidade de atrito relativo aos grãos no método de Ackers e White (1973);
u*cr	velocidade de atrito crítica;
u'*	velocidade de atrito relativo aos grãos no método de Van Rijn (1984);
Uc	velocidade crítica do escoamento, no movimento incipiente;
ucr	velocidade de atrito crítica no método de Van Rijn (1984);
Ucr	velocidade média crítica do escoamento;
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria;
V	Velocidade média do escoamento;
w	velocidade de sedimentação da partícula;
Z	parâmetro de suspensão no método de Van Rijn;
$\Delta$	altura das formas de fundo no método de Van Rijn (1984) e 1,65 no método de Karim (1998);
$\beta$	coeficiente relacionado à difusão das partículas de sedimento;
$\alpha$	coeficiente, no método de Ackers e White (1973), que no regime

	turbulento, devido à rugosidade tem valor igual a dez;
$\phi$	fator de influência das partículas na estrutura do fluido turbulento no método de Van Rijn (1984) e parâmetro adimensional de transporte de Einstein;
$\rho$	massa específica da água;
$\gamma$	peso específico da água;
$\psi$	potência da corrente;
$\nu$	viscosidade cinemática da água;
$\Theta_{cr}$	parâmetro de mobilidade crítica no método de Van Rijn (1984) e parâmetro adimensional da tensão de atrito no método de Cheng (2002);
$\tau_0$	tensão de atrito no leito do canal;
$\rho_s$	massa específica do sedimento;
$\gamma_s$	peso específico do sedimento;
$\sigma_s$	desvio padrão geométrico do material de leito.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 Generalidades .....	19
2.2 Métodos de cálculo da descarga de sedimentos a partir de medições em rios...21	
2.2.1 Método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) .....	21
2.2.2 Método de Colby (1957) .....	35
2.3 Métodos de estimativa indireta da descarga de fundo .....	39
2.3.1 Método de Engelund e Hansen (1967).....	39
2.3.2 Método de Yang (1973).....	39
2.3.3 Método de Ackers e White (1973) .....	42
2.3.4 Método de Van Rijn (1984):.....	44
2.3.5 Método de Karim (1998).....	49
2.3.6 Método de Cheng (2002).....	50
2.4 Trabalhos Realizados.....	51
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>58</b>
3.1. Localização e descrição da bacia.....	58
3.2. Monitoramento Hidrológico e Sedimentológico .....	59
3.2.1 Dados Fluviométricos .....	60
3.2.2. Medidas de descarga líquida.....	61
3.2.3. Medidas de sedimento em suspensão .....	62
3.2.3.1 Amostrador USDH-48 (AMS-1) .....	62
3.2.4. Medidas de sedimento de arraste de fundo .....	64
3.2.5. Amostragem de material de leito.....	64
3.3. Análises de laboratório .....	65
3.3.1 Tubo de retirada pelo fundo .....	67
3.3.2 Ensaio de pipetagem.....	67
3.3.3 Ensaio de filtração.....	68
3.3.4 Ensaio de evaporação.....	69
3.3.5 Ensaio de Peneiramento e Sedimentação .....	70



<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>71</b>
4.1 Resultados de Campo.....	71
4.2 Resultados da Aplicação dos Métodos de Cálculo da Descarga Total de Sedimentos .....	88
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>96</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>98</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>100</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Erosão, transporte e deposição de sedimentos em leitos de cursos d'água são processos naturais e se dão de forma lenta e contínua. Os problemas começam a surgir quando o homem acelera esses processos naturais, ocupando, de forma desordenada e irresponsável as áreas próximas aos rios. A falta de cuidados, como a retirada da vegetação, o manejo inadequado do solo e a urbanização acelerada próxima aos rios, são alguns dos fatores que trazem sérias conseqüências ao meio ambiente e ao homem. Como exemplos dessas conseqüências, podem-se destacar, entre outros, o assoreamento de reservatórios e rios aumentando a incidência das cheias e por conseguinte, dos alagamentos; redução da qualidade da água para consumo e irrigação, mortandade de espécies aquáticas e impossibilidade de navegação devido a diminuição da lâmina d'água. Os custos para a recuperação de um rio ou reservatório assoreado são extremamente altos, por isso medidas preventivas acompanhadas de um monitoramento sedimentométrico são recomendadas.

A quantidade de sedimentos transportada, proveniente do leito do rio, é altamente dependente da composição do material do leito e das características geométricas e hidráulicas da seção e do trecho do rio. Por essa razão qualquer intervenção que altere o equilíbrio natural do rio pode trazer sérias conseqüências em termos de erosão e deposição de sedimentos.

O objetivo deste estudo foi monitorar a produção de sedimentos no Arroio Cancela em Santa Maria, RS visando obter informações que permitam escolher dentre os métodos de cálculo de transporte de sedimentos em rios, o que melhor se adapta ao cálculo do transporte de sedimentos na seção e trecho considerado.

As medições e coletas no campo são de fundamental importância para se obter dados reais da seção ou trecho do rio que se quer analisar. Foram feitas, no Arroio Cancela, entre Dezembro de 2003 a Novembro de 2004, treze campanhas durante eventos de chuva, que compreenderam medidas de descargas líquidas e sólidas. Os trabalhos em laboratório determinaram a distribuição granulométrica do material de leito e do material em suspensão, bem como a concentração do material em suspensão.

Alguns métodos de cálculo de descarga de sedimentos fazem a estimativa da

quantidade de sedimentos transportada pela corrente de maneira indireta, a partir de parâmetros hidráulicos da corrente em uma seção ou trecho do rio e das características do material de leito, enquanto outros, fazem essa estimativa a partir da medição direta da concentração de sedimentos em suspensão, das características hidráulicas da seção ou trecho de rio e das características do material de leito.

Os métodos aplicados neste estudo, foram: Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955), Colby (1957), Engelund e Hansen (1967), Yang (1973), Ackers e White (1973), Van Rijn (1984), Karim (1998) e Cheng (2002).

Os resultados das medições realizadas no período permitiram avaliar tais métodos de cálculo do transporte de sedimentos em rios e comparar seus resultados com dados de medições através de dois parâmetros: a relação entre a descarga de sedimentos calculada pelos métodos e a descarga de sedimentos medida ( $r$ ) e o índice de dispersão (ID).  $r$  é tanto melhor quanto mais próxima de um for a relação e ID é tanto melhor quanto mais próximo de zero for o seu valor.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Generalidades

Segundo Simões et al. (2001) a erosão é um conjunto de processos de desgaste de solos e rochas. Erosão, transporte e deposição de sedimentos são responsáveis pela modelação da Terra. Quando esta erosão é natural, estes processos geológicos encontram-se em condição de equilíbrio. A partir do momento em que o equilíbrio é rompido, com taxas muito altas de erosão, ocorre a erosão acelerada. As perdas de solo na erosão natural são muito pequenas às comparadas com a erosão acelerada. O homem tem sido o principal agente responsável pela erosão acelerada, seja pelo uso de práticas agrícolas inadequadas, seja pela implantação de obras sem considerar as características do solo.

Segundo Carvalho (1994) a sedimentação provém da erosão. Existem quatro tipos de erosão: erosão eólica, erosão hídrica superficial, erosão por remoção em massa e a erosão fluvial. A erosão hídrica superficial pode se dar em forma de erosão pluvial. Erosão pluvial é a erosão que se dá pelo impacto da gota de chuva sobre a superfície do solo. O impacto da gota de chuva destaca a partícula de solo, a qual será transportada pelo escoamento. A erosão depende de muitos fatores e será maior quanto mais desprotegida de vegetação for a superfície do solo.

O transporte dos sedimentos erodidos pode se dar por: carga sólida de arraste, carga sólida saltante e carga sólida em suspensão. A carga sólida de arraste são as partículas de sedimentos que rolam e escorregam sobre o leito dos cursos d'água. A carga sólida saltante são as partículas que pulam devido à colisão umas nas outras e sob o efeito da corrente de água. A carga sólida em suspensão são as partículas de sedimentos capazes de se manter em suspensão pelo fluxo turbulento devido ao seu peso reduzido.

A erosão, acelerada pela ação antrópica pode causar, dentre muitos problemas: a destruição das nascentes de rios, a remoção da camada fértil do solo e a degradação em cursos d'água. O transporte de sedimentos em suspensão atua como portador de poluentes, bactérias e vírus, acarreta também aumento no custo de tratamento da água para consumo, aumento da turbidez na água, redução da penetração de raios de luz na água, impedindo a fotossíntese. O transporte de

sedimento do leito pode diminuir as profundidades dos canais, prejudicando a navegação e provocando enchentes, provoca abrasão em máquinas, obras hidráulicas, árvores e outros quando de sua passagem. O depósito de sedimentos pode reduzir a vida útil de um reservatório, provocar enchentes, assorear canais prejudicando assim, a navegação, a irrigação, a dessedentação de animais, a flora e a fauna locais e o lazer.

Os sedimentos também podem trazer benefícios, tais como: obtenção de materiais ou minérios, aproveitamento de depósitos, ricos em nutrientes, para uso em plantações, veículo de matéria orgânica e microorganismos que equilibram a fauna fluvial, entre outros.

Em pequenas bacias hidrográficas podem ser feitos alguns controles para evitar os danos causados pela erosão. As áreas agrícolas devem respeitar o uso e manejo do solo, considerando o tipo de plantação e respeitando as curvas de nível do terreno. Alguns controles como obras de formação de sulcos, podem conter água e solo que são arrastados. Em áreas urbanas, o impacto das gotas de chuva e as enxurradas são os maiores causadores de erosão. É necessário um sistema de drenagem eficiente e uma manutenção desse sistema, com limpeza de ruas e bueiros. Nas margens dos córregos é importante o reflorestamento ciliar. Como medidas preventivas deve-se impedir a ocupação habitacional desordenada e nos taludes com riscos, devem ser feitas obras civis estruturais.

Conforme Paiva (2001) a carga total de sedimentos transportados em rios é:

$$Q_{st} = Q_{sf} + Q_{ss} + Q_{sb} \quad (2.1)$$

onde:

$Q_{st}$  = descarga de sedimentos total (ton/dia);

$Q_{sf}$  = descarga de sedimentos por arraste de fundo (ton/dia);

$Q_{ss}$  = descarga de sedimentos em suspensão proveniente do leito (ton/dia);

$Q_{sb}$  = descarga de sedimento em suspensão proveniente da bacia (ton/dia).

Existem vários métodos que estimam apenas a carga de sedimentos de fundo, outros, a carga em suspensão, obtendo-se pela soma, a descarga total de sedimentos de fundo. Alguns métodos são usados para estimar a quantidade de sedimentos transportada de maneira indireta, isto é, fazem uso de parâmetros hidráulicos da corrente na seção do rio considerada para estas medições e levam em conta também, as características do material amostrado no leito do rio. Outros

métodos consideram ainda para estimativa da quantidade de sedimentos, além dessas medidas, a medida direta da concentração de sedimentos em suspensão na seção considerada.

Esta revisão apresenta alguns dos diversos métodos de cálculo encontrados na literatura. Dentre estes foram escolhidos, para este estudo, os Métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955), Colby (1957), Engelund e Hansen (1967), Yang (1973), Ackers e White (1973), Van Rijn (1984), Karim (1998) e Cheng (2002).

## **2.2 Métodos de cálculo da descarga de sedimentos a partir de medições em rios**

### **2.2.1 Método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955)**

O Método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) calcula a descarga total de sedimentos a partir de medidas da descarga de sedimentos em suspensão na seção do rio até uma pequena distância do fundo e da extrapolação da carga em suspensão medida até o fundo do rio.

Os dados necessários para a aplicação do método são:

- vazão, em m<sup>3</sup>/s;
- velocidade média do escoamento m/s;
- área da seção transversal em m<sup>2</sup>;
- largura da seção em m;
- profundidade média das verticais de coletas de sedimentos em m;
- concentração de sedimentos em suspensão (ppm);
- distribuição granulométrica de materiais de leito e suspensão coletados na seção;
- temperatura da água;

A seguir é apresentado o Método de Einstein Modificado (1955), conforme descrito em Paiva (2001):

O cálculo da intensidade de atrito, para cada fração individual de grão, é dado pela equação (2.8) ou pela equação (2.9), usa-se o maior valor.

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{D_{35}}{R' \cdot S} \quad (2.2)$$

$$\psi = 0,4 \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{D_i}{R' \cdot S} \quad (2.3)$$

onde:

$\rho, \rho_s$ : massas específicas da água e do sedimento respectivamente;

$D_{35}$ : diâmetro da partícula, para o qual 35% do material do leito, são mais finos;

$D_i$ : diâmetro do grão, da fração considerada;

$R'S$ : produto do raio hidráulico pela declividade da linha de energia, calculado por iteração pela equação:

$$(SR')^{0,5} = \frac{U}{5,75 \cdot g^{0,5} \cdot \log\left[\frac{12,27 \cdot x \cdot d}{D_{65}}\right]} \quad (2.4)$$

onde:

$U$ : velocidade do escoamento;

$x$ : fator de correção da distribuição logarítmica de velocidade, dado na Figura 2.1, com  $d$  substituindo o raio hidráulico e sendo  $\delta$  a espessura da subcamada limite laminar, dada pela equação:

$$\delta = 11,6 \frac{\nu}{u^*} \quad (2.5)$$

na qual:

$$u^* = (g \cdot d \cdot S)^{(1/2)} \quad (2.6)$$

$u^*$ : velocidade de atrito relativa aos grãos;

$\nu$ : viscosidade cinemática da água;

$S$ : declividade da linha de energia;

$d$ : profundidade do escoamento;

$D_{65}$ : diâmetro da partícula, para o qual 65% do material do leito, são mais finos.

A intensidade de transporte de sedimentos,  $\Phi^*$ , é obtida da Figura 2.2, com  $\Psi$  substituindo  $\Psi^*$ .

O cálculo da descarga de fundo, em peso por unidade de largura do canal, para cada fração de diâmetro, é dado pela equação:

$$i_B q_B = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot i_b \cdot \gamma_s \cdot [d' \cdot g \cdot D_i^3]^{0,5} \quad (2.7)$$

onde:

$$d' = \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \quad (2.8)$$

$i_b$ : fração do material do leito de diâmetro  $D_i$ .

O cálculo da carga em suspensão, em peso por unidade de largura, para cada fração de diâmetro, é dada pela equação:

$$q_{s'i} = i_b \cdot \gamma_s \cdot C \cdot q \cdot [(1 - E') - 2,3 \cdot \frac{E' \cdot \log E'}{Pm - 1}] \quad (2.9)$$

onde:

$i_b$ : fração do material em suspensão de diâmetro  $D_i$ ;

$C$ : concentração medida de sedimentos em suspensão;

$q$ : descarga líquida por unidade de largura do canal;

$$E' = \frac{a'}{dv} \quad (2.10)$$

onde:

$a'$ : profundidade não amostrada;

$dv$ : profundidade média nas verticais de amostragem e,

$$Pm = 2,3 \cdot \log\left(\frac{30,2 \cdot x \cdot d}{D_{65}}\right) \quad (2.11)$$

Cálculo do expoente  $Z'$ , da distribuição de concentração, de Rouze (1937), para cada fração de diâmetro, por tentativas, de modo a satisfazer a equação:

$$\frac{Q_{s'i}}{i_b \cdot Q_b} = \frac{q_{s'i} \cdot B}{B \cdot i_b \cdot q_b} = \frac{I_1}{J_1} \cdot (Pm \cdot J'1 + J'2) \quad (2.12)$$

$$I1 = 0,216 \cdot \frac{E'^{Z'-1}}{(1 - E1)^{Z'}} \cdot J1 \quad (2.13)$$

$$J1 = \int_{E1}^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^{Z'} \cdot dy \quad (2.14)$$

$$J2 = \int_{E1}^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^{Z'} \cdot \ln y \cdot dy \quad (2.15)$$



$$J1' = \int_{E'}^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^{Z'} \cdot dy \quad (2.16)$$

$$J2' = \int_{E'}^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^{Z'} \cdot \ln y \cdot dy \quad (2.17)$$

$$E1 = \frac{2 \cdot D1}{d} \quad (2.18)$$

sendo os valores de I1 obtidos na Figura 2.3, os valores de J1 e J1' das Figuras 2.6a e 2.6b e os valores de J2 e J2' das Figuras 2.7a e 2.7b.

Procedimento de Lara (1966):

- seleciona-se então pelo menos 3 frações de diâmetros existentes tanto na carga em suspensão como na carga de fundo e calcula-se os valores correspondentes de Z'i para esses diâmetros pela equação 2.18.
- plota-se os valores de Z'i em papel logarítmico em função da velocidade de sedimentação  $w_i$ . Em seguida, obtém-se por mínimos quadrados, uma equação, da qual são obtidos os valores de Z' para as demais faixas de diâmetro. A equação tem a forma:

$$Z'_i = a \cdot w_i^b \quad (2.19)$$

onde:

$w_i$  : velocidade de sedimentação da partícula de diâmetro  $D_i$ , dada pela equação de Rubey (1933) na forma:

$$w = \frac{\left[ \frac{2}{3} \cdot g \cdot \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \cdot D_i^3 + 36 \cdot v^2 \right]^{(1/2)} - 6 \cdot v}{D_i} \quad (2.20)$$

Quando não se tem 3 frações de diâmetro comuns em suspensão e no fundo, adota-se o procedimento original de Colby e Hembree (1955):

- calcula-se o valor de Z' para o diâmetro de grão dominante na carga em suspensão por iteração de modo a satisfazer a equação 2.18, partindo com o valor inicial obtido da Figura 2.5, proposta por Hubbel (1964) e calculam-se os valores de Z' para as demais frações, pela equação:

$$\frac{Z'_r}{Z'_1} = \left( \frac{w_i}{w_1} \right)^{0,7} \quad (2.21)$$

onde:

$Z'_1$ : valor de  $Z'$  para o grão dominante;

$w_1$ : velocidade de sedimentação do grão dominante.

Calcula-se  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_1'$  e  $J_2'$  pelas equações 2.14, 2.15, 2.16 e 2.17 ou pelas Figuras 2.6a, 2.6b, 2.7a, 2.7b e 2.8:

a) Calcula-se  $I_1$  pela equação 2.13 ou pela Figura 2.3 e  $I_2$  pela Figura 2.4 ou pela equação:

$$I_2 = 0,216 \cdot \frac{E_1^{z-1}}{(1-E_1)^z} \int_{E_1}^1 \left(\frac{1-Y}{Y}\right)^z \cdot \ln y \cdot dy \quad (2.22)$$

b) Calcula-se, para cada fração de diâmetro, a carga total de sedimentos, pelas equações:

- para sedimentos finos (wash load):

$$i_T \cdot Q_T = Q_{s,i} \cdot \frac{P_m \cdot J_1 + J_2}{P_m J_1' + J_2'} \quad (2.23)$$

- para sedimentos grossos (de fundo):

$$i_T \cdot Q_T = i_b \cdot Q_b \cdot (P_m \cdot I_1 + I_2 + 1) \quad (2.24)$$

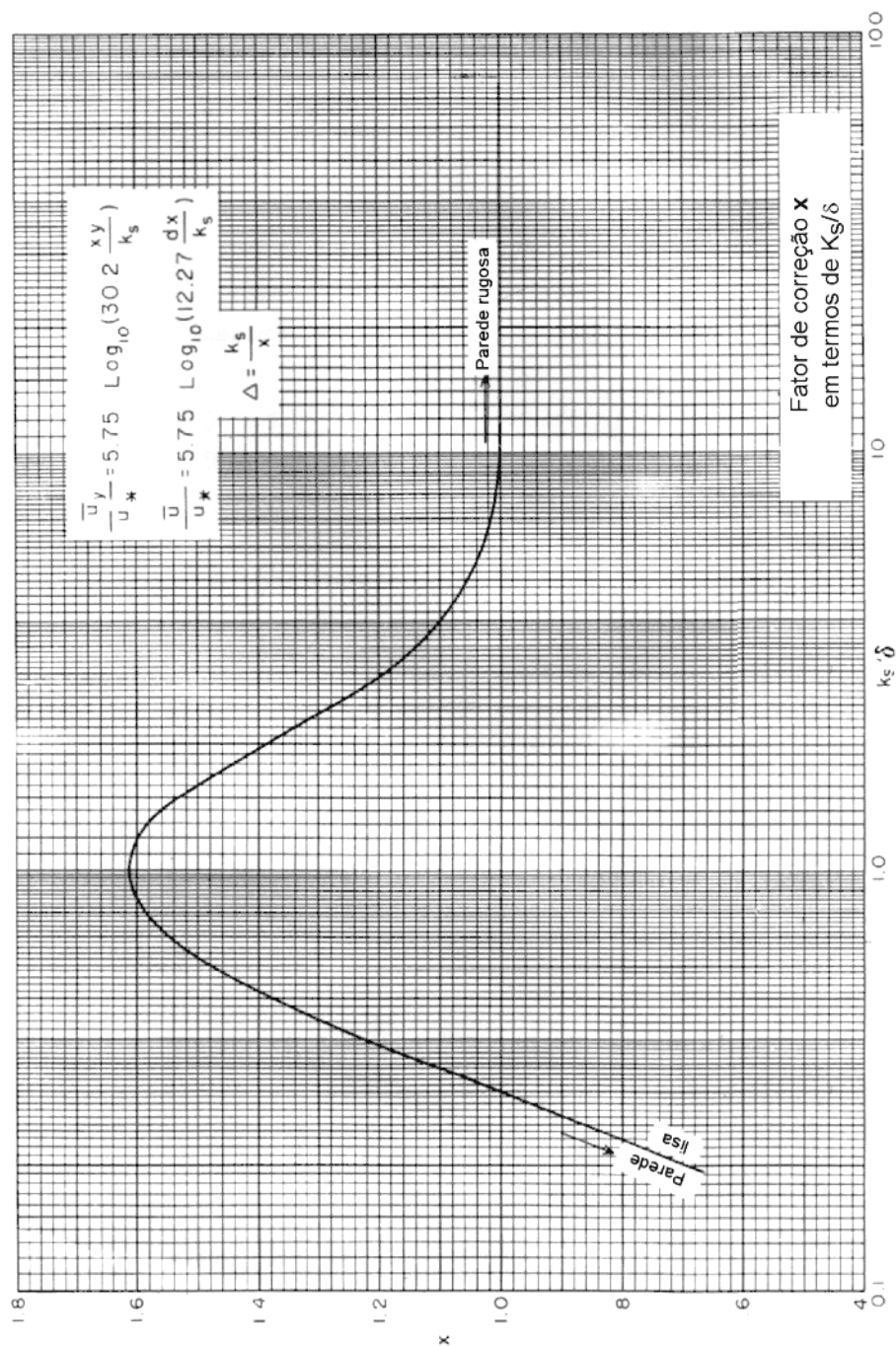


Figura 2.1 - Fator de correção da distribuição logarítmica da velocidade segundo Einstein (1950). Fonte: Paiva (2001).

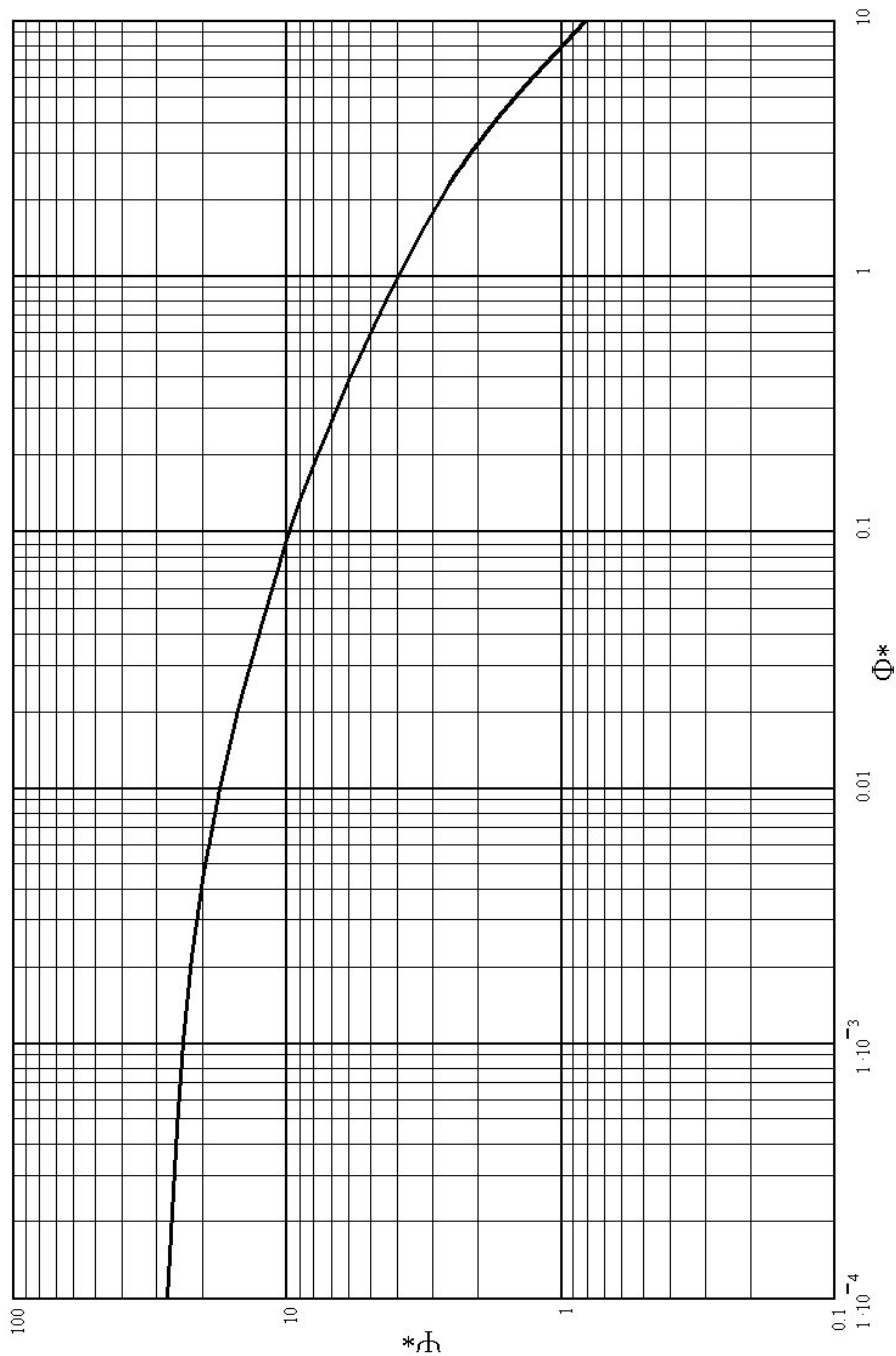
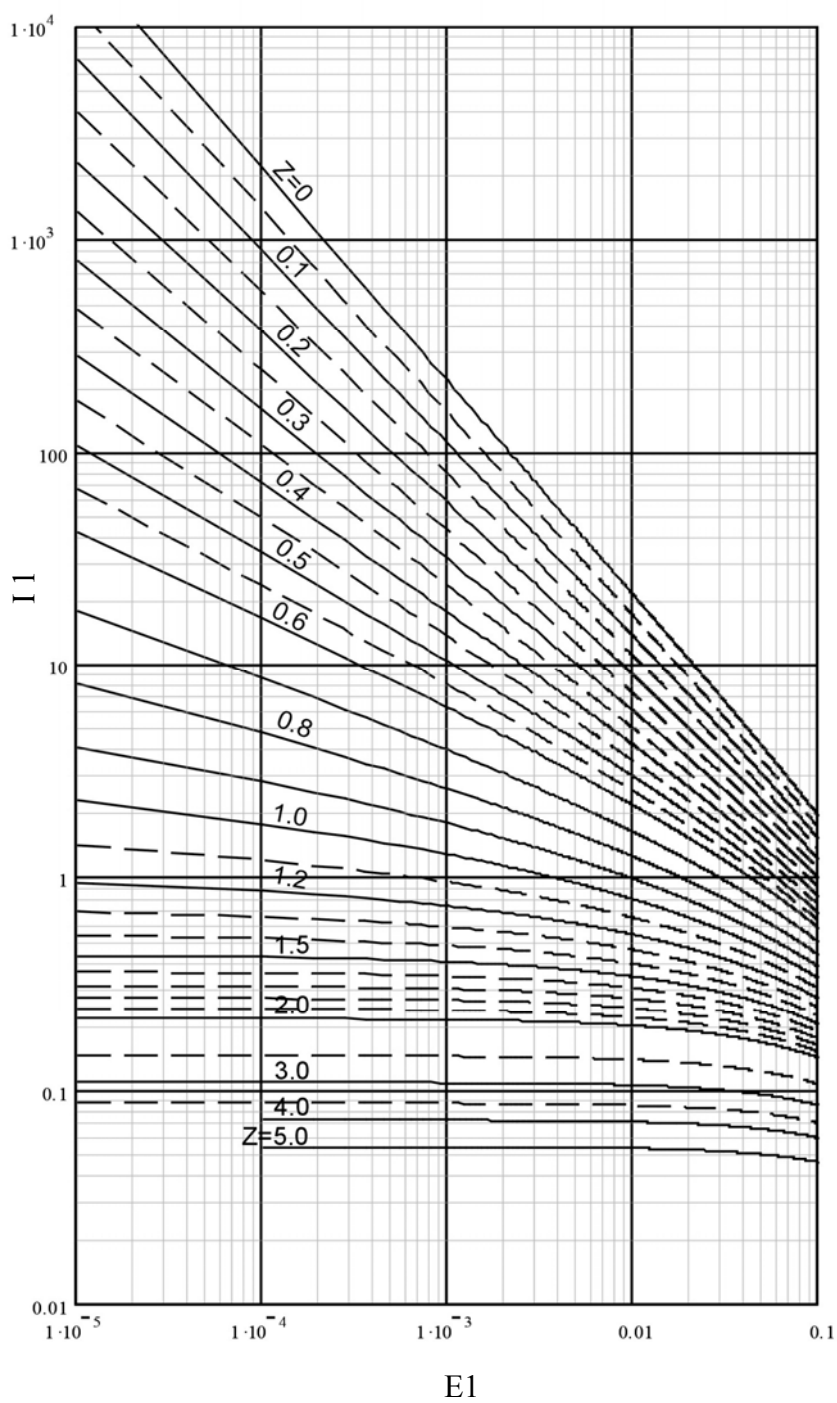
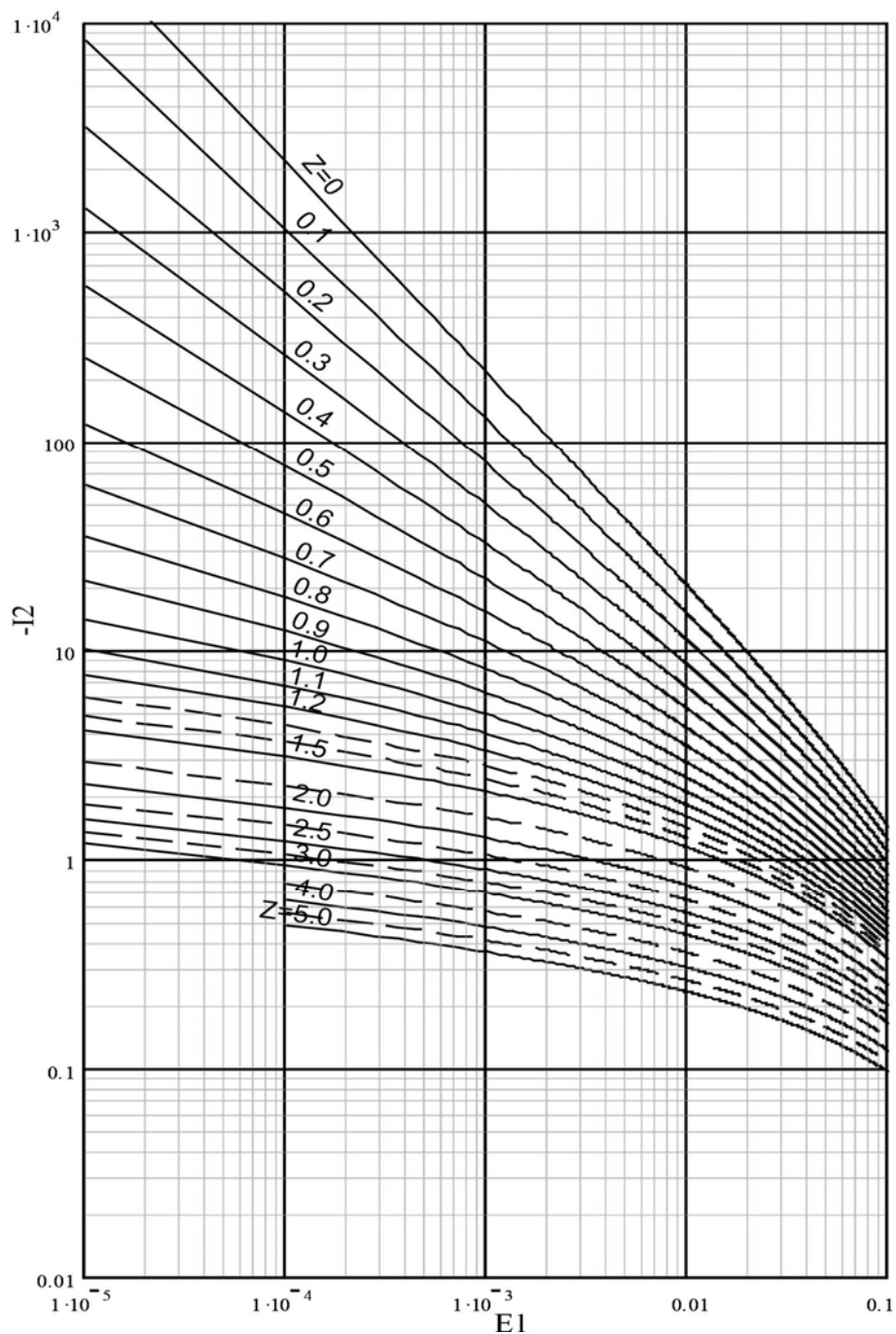


Figura 2.2 – Ábaco da função de carga do fundo segundo Einstein (1950).

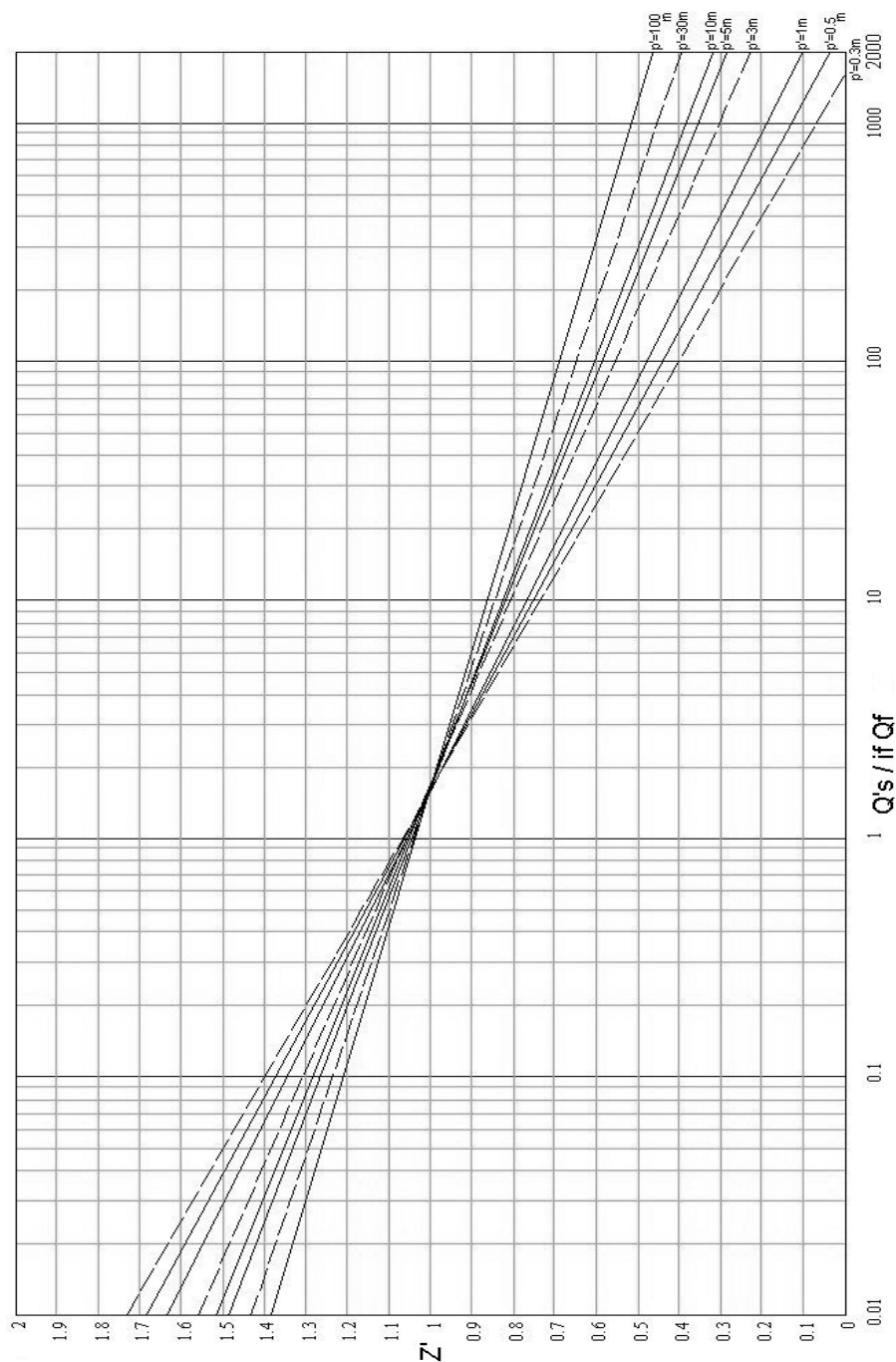
Fonte: Paiva (2001).



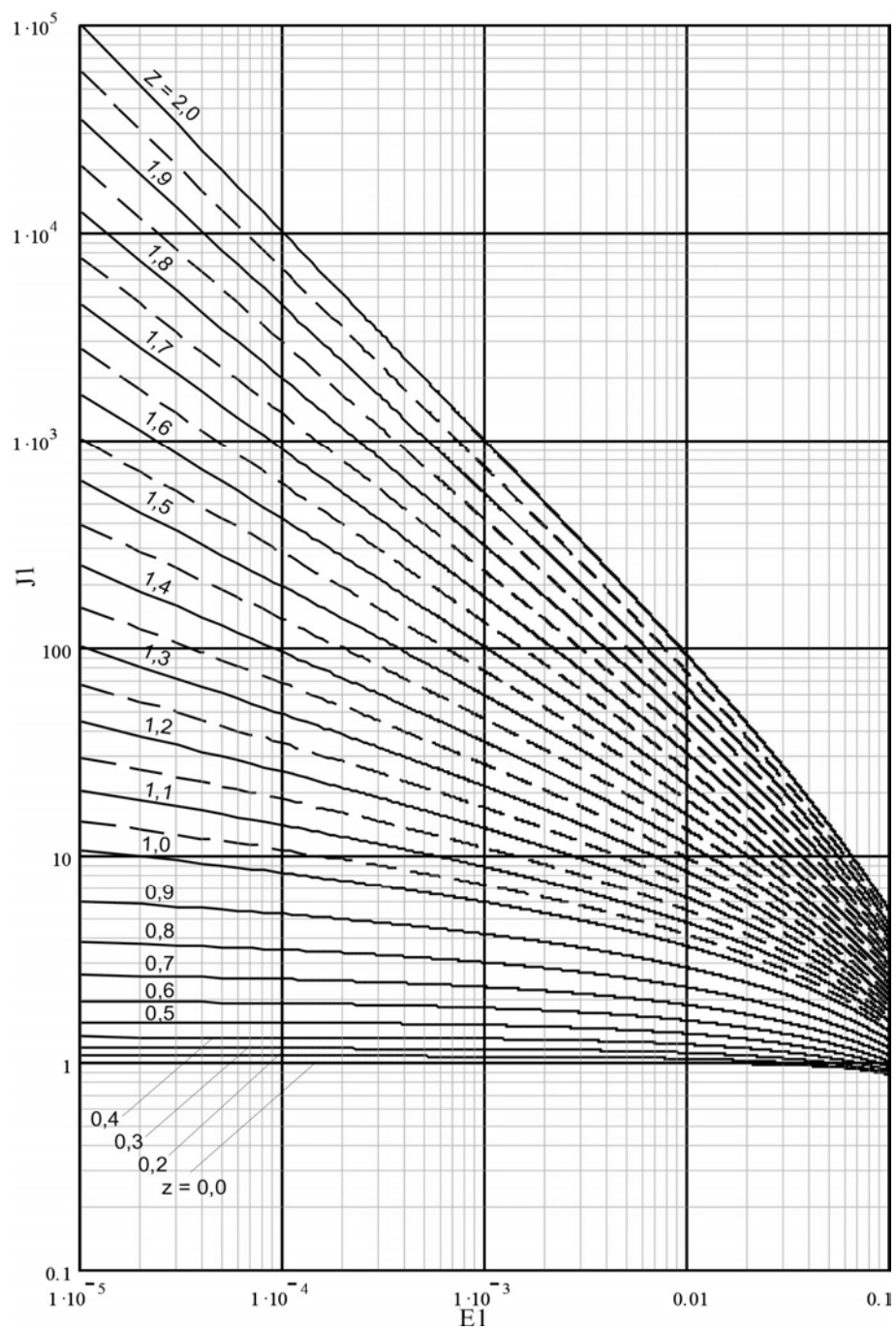
**Figura 2.3 - Valores de  $I_1$ , em termos de  $E_1$ , para vários valores de  $z$  segundo Einstein (1950). Fonte: Paiva (2001).**



**Figura 2.4 - Valores de  $I_2$ , em termos de  $E_1$ , para vários valores de  $Z$  segundo Einstein (1950). Fonte: Paiva (2001).**



**Figura 2.5 - Valores de  $Z'$  em função de  $Q's / if.Qf$ , para o grão dominante segundo Colby e Hubel (1964). Fonte: Paiva (2001).**



**Figura 2.6a - Integral de  $J_1$  em termos de  $EI$  e  $Z'$  segundo Colby e Hembree (1955). Fonte: Paiva (2001).**



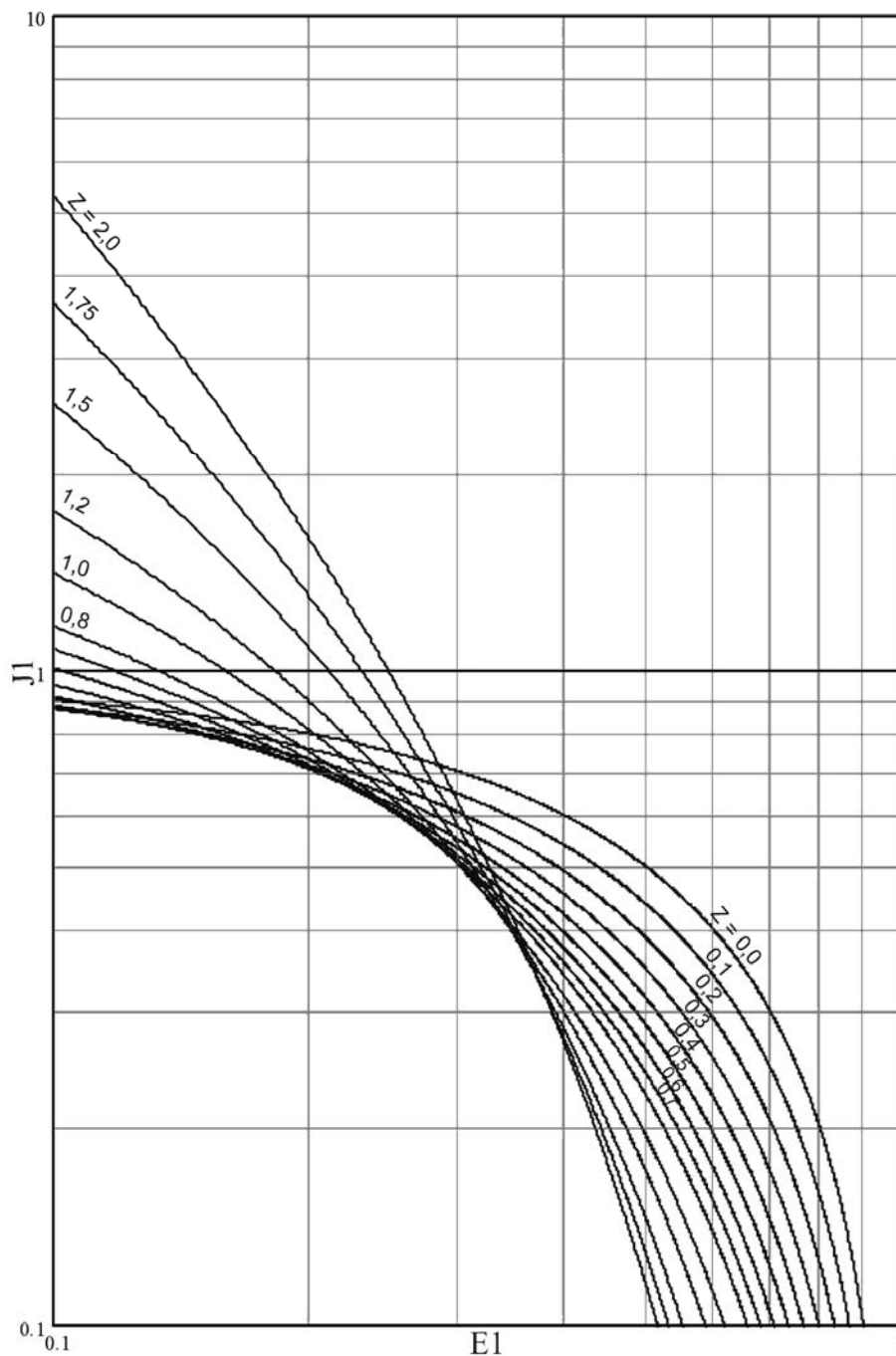
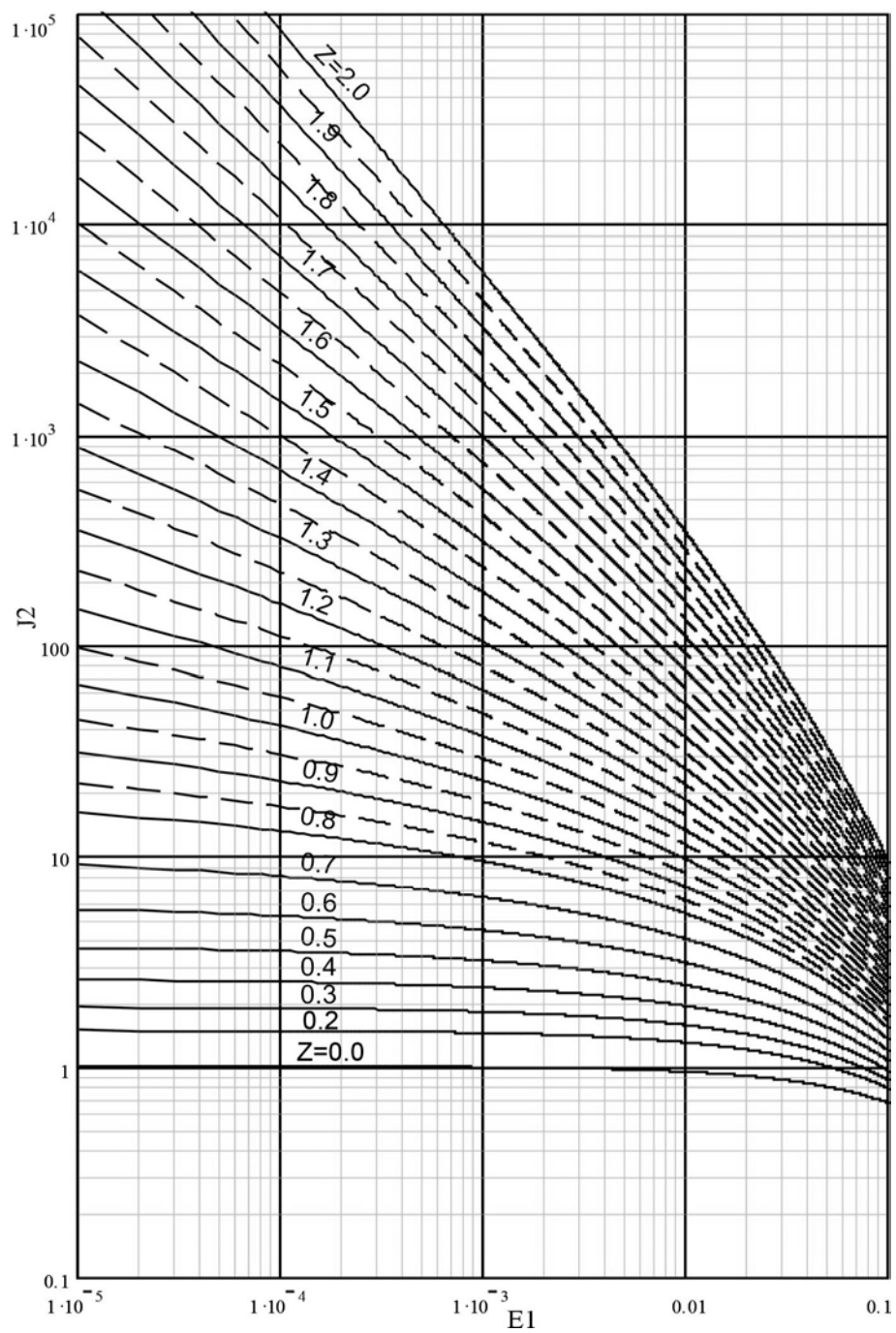
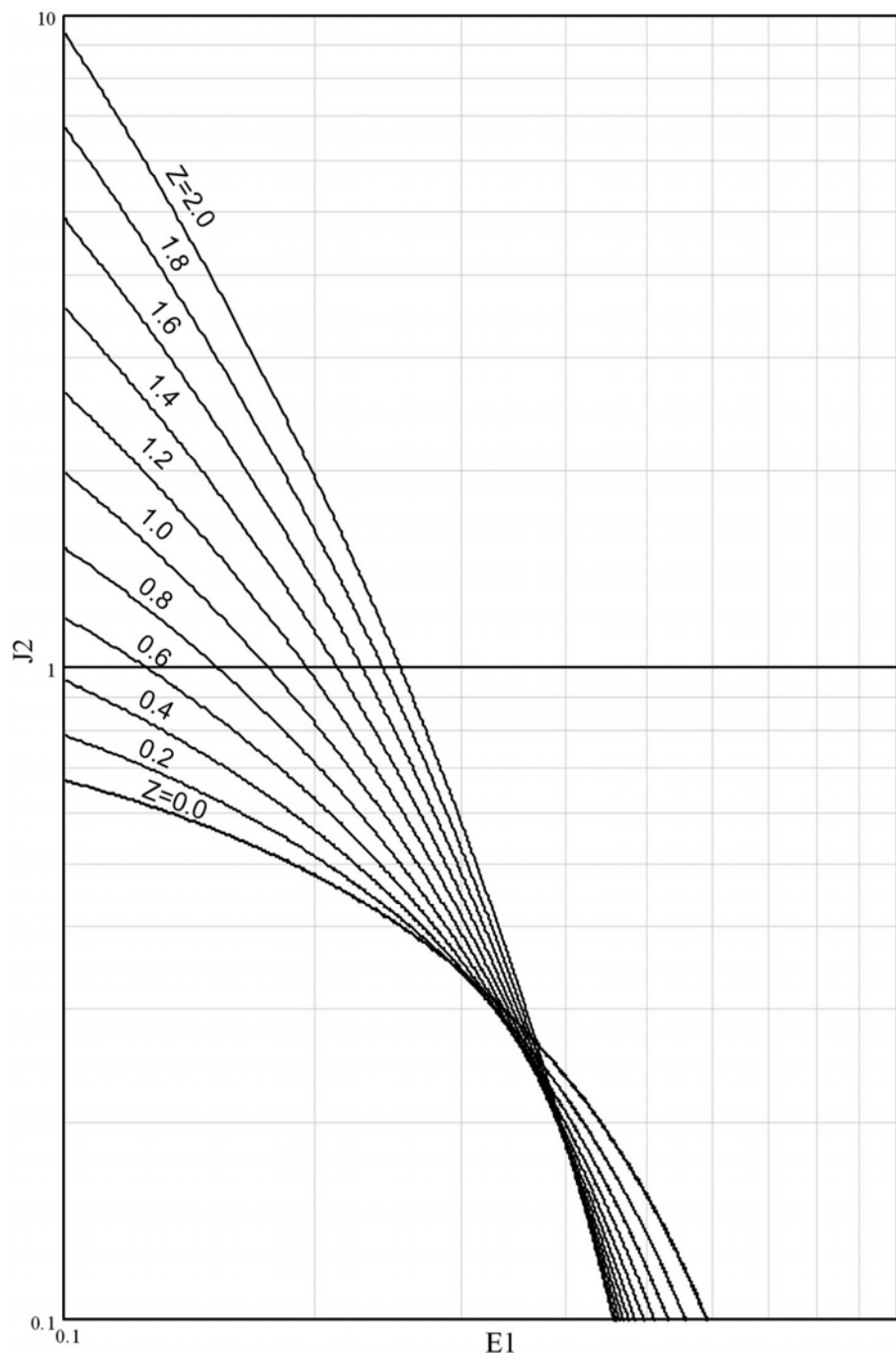


Figura 2.6b - Integral de  $J_1$  em termos de  $E_1$  e  $Z'$  segundo Colby e Hembree (1955). Fonte: Paiva (2001).



**Figura 2.7a - Integral de  $j_2$  em termos de  $E_1$  e  $z'$  segundo Colby e Hembree (1955). Fonte: Paiva (2001).**



**Figura 2.7b - Integral de  $j_2$  em termos de  $E_1$  e  $z'$  segundo Colby e Hembree (1955). Fonte: Paiva (2001).**

A fim de otimizar o tempo de aplicação de equações para o cálculo da descarga total de sedimentos, foi utilizado um programa para a resolução do Método Modificado de Einstein por Colby e Hembree (1955). O programa 'Einstein.xls' foi desenvolvido por Mendes (2001) e obteve o apoio técnico de Carvalho.

### 2.2.2 Método de Colby (1957)

Colby (1957 apud PAIVA 1988) mostra que seu método simplificado usa dados de descarga líquida, profundidade média, velocidade média, largura da seção e concentração de sedimentos em suspensão. Tal método é vantajoso devido ao reduzido número de dados necessários à sua aplicação, tornando-o um método bastante simples. Com este método, o trabalho de sedimentometria torna-se econômico e fácil, pois só precisa usar medidas de descarga líquida e da concentração de sedimentos em suspensão, o que reduz bastante os trabalhos de laboratório e de campo.

Para aplicação do Método de Colby, os seguintes dados de entrada são necessários:

Q: vazão (m<sup>3</sup>/s);

B: largura da superfície do canal (m);

C: concentração (mg/L);

U: velocidade média do escoamento (m/s);

d: profundidade do escoamento (m);

O cálculo da descarga sólida medida (Q<sub>sm</sub>) é dado pela equação:

$$Q_{sm} = 0,0864.Q.C's \quad (2.25)$$

O cálculo da descarga sólida não medida, por unidade de largura (q<sub>nm</sub>) é dado pela equação 2.26 ou pela Figura 2.8.

$$\log q_{nm} = 3,432.\log U + 1,6004 \quad (2.26)$$

Calcula-se a concentração relativa (C<sub>r</sub>) por:

$$\log C_r = A.\log U + B \quad (2.27)$$

onde A e B são apresentados na Tabela 2.1, em função da profundidade.

Calcula-se a razão de eficiência:

$$e = \frac{C's}{C_r} \quad (2.28)$$

**Tabela 2.1 - Valores de A e B para Cr em função da profundidade média.**

D	A	B
<0.35	1,8066	3,2627
0.35 a 0.45	1,8365	3,1760
0.45 a 0.55	1,9111	3,1139
0.55 a 0.65	1,9512	3,0881
0.65 a 0.75	1,9730	3,0512
0.75 a 0.85	1,9897	3,0212
0.85 a 0.95	1,8213	2,9289
0.95 a 1.10	2,0388	2,9692
1.10 a 1.30	1,9069	2,9002
1.30 a 1.50	2,1377	2,9031
1.50 a 1.70	2,1772	2,8642
1.70 a 1.90	2,1865	2,8243
1.90 a 2.50	2,2393	2,7782
2.50 a 3.50	2,2319	2,6990
3.50 a 4.50	2,4540	2,6236
4.50 a 5.50	2,5129	2,5446
5.50 a 6.50	2,5727	2,4914
6.50 a 7.50	2,6859	2,4651
7.50 a 8.50	2,6674	2,3979
8.50 a 9.50	2,7665	2,3696
9.50 a 11	2,8102	2,3224
11 a 13	2,9199	2,2304
13 a 15	3,0768	2,1303
15 a 17	3,1964	2,0414
17 a 19	3,3046	1,9590
19 a 21	3,4190	1,8554
21 a 23	3,5844	1,7661
23 a 25	3,5913	1,6532
25 a 27	3,5476	1,5341
27 a 29	3,9694	1,4639
29 a 31	4,1821	1,3441

O fator de correção (K) é obtido pela equação:

$$\log K = 0,4732 \cdot \log\left(\frac{C's}{C_r}\right) + 0,0753 \quad (2.29)$$

Calcula-se, então, a descarga sólida não medida com:

$$Q_{nm} = q_{nm} \cdot B \cdot K \quad (2.30)$$

A descarga sólida total (ton/dia) é calculada pela soma da descarga sólida medida com a descarga sólida não medida:

$$Q_{st} = Q_{sm} + Q_{nm} \quad (2.31)$$