

Programa de Pós-Graduação em **Engenharia Civil e Ambiental**

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Departamento de Engenharia Civil

**A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TOTAL EM
CANAIS ALUVIAIS E SUA PREVISÃO**

HUGO MORAIS DE ALCÂNTARA

Campina Grande
Data: MARÇO / 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TOTAL EM CANAIS ALUVIAIS E
SUA PREVISÃO**

Hugo Morais de Alcântara

Campina Grande – PB

Março – 2007

Hugo Morais de Alcântara

**A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TOTAL EM CANAIS ALUVIAIS E
SUA PREVISÃO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós –
Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, do
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, da
Universidade Federal de Campina Grande, em
cumprimento às exigências a obtenção do Grau
de Mestre.

Área de Concentração: ENGENHARIA HIDRÁULICA

Orientador: VAJAPEYAM SRIRANGACHAR SRINIVASAN

Campina Grande – PB

Março – 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A347v

2007 Alcântara, Hugo Morais.

A variação da resistência total em canais aluviais e sua previsão / Hugo Morais Alcântara. — Campina Grande, 2007.

144f. : il

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientador: Dr. Vajepeyam Srirangachar Srinivasan.

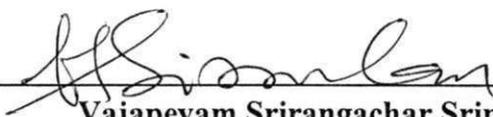
1. Canais Erodíveis. 2. Resistência Hidráulica. 3. Efeito da Distribuição Granulométrica. I. Título.

CDU 626.1(043)

Hugo Morais de Alcântara

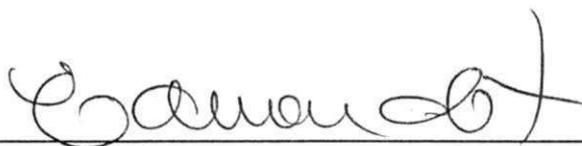
**A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TOTAL EM CANAIS ALUVIAIS E
SUA PREVISÃO**

Dissertação defendida em 29 de março de 2007



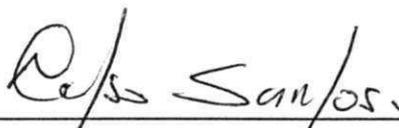
Vajapeyam Srirangachar Srinivasan

Orientador



Eduardo Enéas de Figueiredo

Examinador interno



Celso Augusto Guimarães Santos

Examinador externo

Campina Grande – PB

Março de 2007

**Dedico,
a minha família.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo conquistado até hoje.

Aos meus pais, Geraldo Paulino de Alcântara e Maria do Socorro Morais de Alcântara, pelas lições de simplicidade e respeito ao próximo.

A minha segunda mãe Júlia pelo apoio e grande ajuda na minha educação.

A minha esposa, Fabrícia, pela compreensão e dedicação nos momentos difíceis.

Ao professor Vajapeyam Srirangachar Srinivasan, pela orientação e exemplo de profissionalismo.

A todos os professores da Área de Recursos Hídricos pela formação que recebi.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica que sempre estiveram prontos a ajudar.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a conclusão de mais esta etapa.

RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a natureza da variação da resistência total em canais aluviais e propor uma função de resistência total. A partir da equação fundamental da resistência da superfície, é definida uma função cuja variação pode ser associada aos efeitos da forma do leito e da distribuição granulométrica de sedimentos. A forma desta função, obtida através de análise dimensional utilizando a técnica de regressão linear múltipla, é apresentada para sedimentos unimodais e bimodais associada a cada tipo de canal e mistura de sedimentos. Foi utilizada uma grande massa de dados experimentais de laboratório e de campo coletados por diversos pesquisadores em vários estudos. Com base nos diversos estudos encontrados na bibliografia e considerando as incertezas envolvidas na separação da resistência total em, a resistência devido aos grãos na superfície e das formas do leito, decidiu-se propor uma função de resistência separadamente para cada forma do leito para o parâmetro de resistência B . A grande vantagem da metodologia proposta é que esta avalia a resistência total do leito sem a necessidade de separação dos efeitos dos grãos e das formas do leito. Os resultados mostram que uma excelente relação funcional pode ser estabelecida para cada forma do leito e mistura de sedimentos utilizando três e dois parâmetros adimensionais. O efeito da distribuição granulométrica dos sedimentos ficou evidenciado no caso do leito plano e com sedimentos bimodais, indicando que nos casos em que a distribuição natural – log-normal – de sedimentos não seja aplicável, o efeito da distribuição granulométrica é significativo na resistência total do canal aluvial.

Palavras-chave: Canais erodíveis, resistência hidráulica, efeito da distribuição granulométrica.

ABSTRACT

The present work has the objective of evaluating the variation of the hydraulic resistance in alluvial channels and propose a function of total resistance. Starting from the fundamental concept of the resistance of the surface, a function is defined in which the variation of resistance can be associated with the characteristics of the bed form and the grain size distribution of the mixture of the sediments in the bed. The form of this function, obtained through dimensional analysis using the technique of multiple linear regression, is presented for unimodal and bimodal sediments associated with each channel type and mixture of sediments. Utilizing the data collected by various researchers in laboratory canals and rivers, the functional relationships for the resistance factor, here in identified as a dimensionless factor “B”, has been established utilizing three, or in a simple form, two, dimensionless parameters as independent variables. The great advantage of the resistance function proposed here is that it eliminates the need to separate the total resistance into two components. The results show that an excellent functional relationship can be established for each bed form and mixture of sediments using three parameters. The influence of the grain size distribution of the sediments was evidenced in the case of all the bed forms and especially bimodal sediments. In the cases of natural distribution (log-normal) of sediments in the sand range, the effect on the individual grain size distributions became hardly noticeable.

Keywords: Alluvial Channels, hydraulic resistance, effect of the grain size distribution.

LISTA DE SÍMBOLOS

a_i	Constante, Comprimento do Eixo mais longo da Partícula
A	Área da Seção Transversal ao Fluxo
A_b	Área do Leito
A_w	Área das Paredes
b_i	Comprimento do Eixo Intermediário da Partícula
b	Largura do Canal
B_m	Parâmetro de Bimodalidade
c_m	Comprimento do Eixo menor da Partícula
C, C_s	Concentração ou Massa de Sedimentos por unidade de volume de água
C_{db}, C_l	Coefficientes dinâmicos do fluxo
d, h	Profundidades do Fluxo
D	Diâmetro Representativo do Material do Leito
D_c	Tamanho dos Grãos do Modo Grosso em Sedimentos Bimodais
D_f	Tamanho dos Grãos do Modo Fino em Sedimentos Bimodais
D_i	Diâmetro Representativo da Fração i
$D_m = D_{50}$	Diâmetro Mediano da Mistura
f	Coefficiente de Atrito do Canal
f_b	Coefficiente de Atrito Relativo ao Leito
f_i	Proporção de Sedimentos da Fração i no Leito
F, F_r	Número de Froude
F_w, f_w	Coefficiente de Atrito das Paredes do Canal
g	Aceleração Gravitacional
k	Constante de Von Karman
K_1, K_2, K_n	Fatores de forma da partícula
K_r	Fator de Forma para um Trecho do Canal
K_S	Fator de Forma para a Seção Transversal do Canal
k_s	Rugosidade Equivalente do Leito
L	Dimensão Linear de Referência
p	Exposição do Grão para o Interior do Fluxo
P_m	Proporção de sedimento em cada modo
P	Perímetro Molhado

Q	Vazão expressa em volume por unidade de tempo
R	Raio Hidráulico do Leito
R'	Raio Hidráulico da Superfície do Leito
R''	Raio Hidráulico das Formas do Leito
R_e	Número de Reynolds do Fluxo
R_{e*}	Número de Reynolds de Cisalhamento da Partícula
s	Densidade do Sedimento
S, S_E	Declividade da Linha de Energia
U, U_m, V	Velocidade Média de Fluxo
U_*, u_{*b}	Velocidade de Cisalhamento no Leito
U_{cr}, u_{*bcr}	Velocidade de Cisalhamento Crítica no Leito
w	Velocidade de Queda da Partícula
y	Profundidade Arbitrária
U'_{*b}	Velocidade de Cisalhamento devido ao atrito com os grãos
U''_{*b}	Velocidade de Cisalhamento devido às Formas do Leito
ρ	Massa Específica da Água
ρ_s	Massa Específica do Sedimento
σ	Desvio Padrão da Distribuição Granulométrica
β	Parâmetro de Einstein ou Fator de Forma da Partícula
γ	Peso Específico da Água
γ_s	Peso Específico do Sedimento
ν	Viscosidade Cinemática do Fluido
δ	Espessura da Subcamada Limite Laminar
ψ'	Parâmetro de Intensidade de Cisalhamento (Equação de Einstein)
μ	Viscosidade Dinâmica do Fluido
τ_{ocr}	Tensão de Cisalhamento Crítica no Leito
$\Delta\gamma_{sub}, \gamma'_{sub}$	Peso Específico Submerso do Sedimento ($\Delta\gamma_{sub} = \gamma_{sub} - \gamma$)
τ^*, τ_i^*	Parâmetros de Shields
Ψ_{35}	Intensidade de Cisalhamento sobre as Partículas cujo Tamanho é D_{35}
τ_b	Tensão de Cisalhamento no Leito
τ_b'	Tensão de Cisalhamento devido ao atrito com a Superfície do Leito
τ_b''	Tensão de Cisalhamento devido às Formas do Leito

τ_{ci}	Tensão de Cisalhamento Crítica da Fração i
τ, τ_o	Tensão de Cisalhamento Dimensional no Leito
τ_{ri}	Tensão de Cisalhamento Crítica de Referência

LISTA DE FIGURAS

2.1	Valores da tensão de cisalhamento crítica de referência τ_{ri} em função da razão D_i / D_{50} com outros sedimentos [Wilcock & Southard (1989)]	10
2.2	Esquema geral das formas do leito	12
2.3	Critério do número de Froude para a previsão das formas do leito	14
2.4	Relação de Srinivasan (1969) para a determinação das formas do leito	15
2.5	Variação do coeficiente k com a concentração de sedimentos (após Einstein <i>et al.</i> , 1954)	17
2.6	Fator de atrito para fluxos sobre leito plano em canais aluviais, o número de cada ponto é $R/D_{50} \times 10^{-2}$ (após Lovera & Kennedy, 1969)	18
2.7	Variação da tensão de cisalhamento com a velocidade do fluxo – Ensaio de Vanoni & Brooks (Raudikivi, 1976)	20
2.8	Variação do fator de atrito com a velocidade do fluxo para dois trechos do rio Grande – (Alan & Kennedy, 1969)	20
2.9	Relação de Einstein & Barbarossa (1952) para a resistência ao fluxo devido às formas do leito (Simons & Richardson, 1992)	22
2.10	Dados de campo plotados na curva de Einstein & Barbarossa (Garde & Rangaraju, 1966)	22
2.11	Dados de laboratório plotados na curva de Einstein & Barbarossa (Garde & Rangaraju, 1966)	23
2.12	Intensidade de cisalhamento devido as irregularidades do canal como uma função do transporte de sedimentos	23
3.1	Relações entre A_s , A_r e F_r	29
3.2	Distribuições granulométricas disponíveis e utilizadas	42
3.3	Distribuições granulométricas das misturas utilizadas por Guy <i>et al.</i> (1966) no canal de 2,44 m de largura	43
3.4	Distribuições granulométricas das misturas utilizadas por Guy <i>et al.</i> (1966) no canal de 0,61 m de largura	43
3.5	Distribuição granulométrica da mistura utilizada por Srinivasan (1969)	44
3.6	Distribuições granulométricas das quatro misturas utilizadas por Samaga <i>et al.</i> (1986)	46

3.7	Distribuições granulométricas das três misturas unimodais utilizadas por Siqueira (1997)	48
3.8	Distribuição granulométrica das três misturas bimodais utilizadas por Medeiros (1999)	49
4.1	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 1 com três parâmetros.	65
4.2	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 2 com três parâmetros.	65
4.3	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 3 com três parâmetros.	65
4.4	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com três parâmetros.	66
4.5	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com três parâmetros.	66
4.6	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 3 com três parâmetros.	66
4.7	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 1 com três parâmetros.	67
4.8	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 2 com três parâmetros.	67
4.9	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 3 com três parâmetros.	68
4.10	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 1 com dois parâmetros.	69
4.11	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 2 com dois parâmetros.	69
4.12	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 3 com dois parâmetros.	69
4.13	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com dois parâmetros.	70
4.14	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com dois parâmetros.	70

4.15	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 3 com dois parâmetros.	70
4.16	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 1 com três parâmetros.	71
4.17	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 2 com três parâmetros.	71
4.18	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 3 com três parâmetros.	71
4.19	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para <i>ripples</i> com dados agrupados com três parâmetros	72
4.20	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas com dados agrupados com três parâmetros	72
4.21	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com três parâmetros	72
4.22	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para <i>ripples</i> com dados agrupados com dois parâmetros	73
4.23	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas com dados agrupados com dois parâmetros	73
4.24	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com dois parâmetros	74
4.25	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> - Mistura 1 com três parâmetros.	76
4.26	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> - Mistura 3 com três parâmetros	76
4.27	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> - Mistura 4 com três parâmetros	76
4.28	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 2 com três parâmetros	77
4.29	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 4 com três parâmetros	77
4.30	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 9 com três parâmetros	77

4.31	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 1 com três parâmetros	78
4.32	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 3 com três parâmetros	78
4.33	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 9 com três parâmetros	78
4.34	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> - Mistura 1 com dois parâmetros	79
4.35	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> - Mistura 4 com dois parâmetros	80
4.36	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 1 com dois parâmetros	80
4.37	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 3 com dois parâmetros	80
4.38	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 1 com dois parâmetros - Guy <i>et al.</i> (1966)	81
4.39	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 9 com dois parâmetros - Guy <i>et al.</i> (1966)	81
4.40	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 7 com três parâmetros - Guy <i>et al.</i> (1966)	82
4.41	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 8 com três parâmetros - Guy <i>et al.</i> (1966)	83
4.42	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 6 com dois parâmetros	83
4.43	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 7 com dois parâmetros	84
4.44	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 7 com dois parâmetros	84
4.45	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 8 com dois parâmetros	85
4.46	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> com dados agrupados com três parâmetros	86

4.47	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> com dados agrupados com dois parâmetros	86
4.48	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com três parâmetros	87
4.49	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com dois parâmetros	87
4.50	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com três parâmetros	87
4.51	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com dois parâmetros	88
4.52	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano com três parâmetros - Srinivasan (1969)	89
4.53	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano com dois parâmetros - Srinivasan (1969)	89
4.54	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 1 com três parâmetros - Medeiros (1999)	92
4.55	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 2 com três parâmetros - Medeiros (1999)	93
4.56	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 3 com três parâmetros - Medeiros (1999)	93
4.57	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 1 com dois parâmetros - Medeiros (1999)	93
4.58	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 2 com dois parâmetros - Medeiros (1999)	94
4.59	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 3 com dois parâmetros - Medeiros (1999)	94
4.60	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano - Mistura 2 - três parâmetros - Medeiros (1999)	95
4.61	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano - Mistura 3 com três parâmetros - Medeiros (1999)	95
4.62	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano - Mistura 2 com dois parâmetros - Medeiros (1999)	95

4.63	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano - Mistura 3 com dois parâmetros - Medeiros (1999)	96
4.64	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c após o agrupamento para dunas com três parâmetros - Medeiros (1999)	96
4.65	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c após o agrupamento para dunas com dois parâmetros - Medeiros (1999)	96
4.66	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c após o agrupamento para leito plano com três parâmetros - Medeiros (1999)	97
4.67	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c após o agrupamento para leito plano com dois parâmetros - Medeiros (1999)	97
4.68	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Ganges com três parâmetros adimensionais	99
4.69	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Middle Loup com três parâmetros adimensionais	100
4.70	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Mississippi com três parâmetros adimensionais	100
4.71	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Missouri com três parâmetros adimensionais	100
4.72	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Ganges com dois parâmetros adimensionais	101
4.73	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Middle Loup com dois parâmetros adimensionais	101
4.74	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Mississippi com dois parâmetros adimensionais	101
4.75	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Mississippi com dois parâmetros adimensionais	102
4.76	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para todos os rios com três parâmetros adimensionais	103
4.77	Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para todos os rios com dois parâmetros adimensionais	103
4.78	Gráfico comparativo dos valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados - Rios e Canais de Laboratório com três parâmetros	105

4.79	Gráfico comparativo dos valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados - Rios e Canais de Laboratório com dois parâmetros	106
B.1	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com três parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	122
B.2	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 3 com três parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	122
B.3	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 2 com dois parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	122
B.4	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 3 com dois parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	123
B.5	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com dois parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	123
B.6	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 4 com dois parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	123
B.7	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 9 com dois parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	124
B.8	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 3 com dois parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	124
B.9	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 5 com três parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	124
B.10	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 6 com três parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	125
B.11	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 7 com três parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	125
B.12	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 7 com três parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	125
B.13	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 5 com dois parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	126
B.14	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 5 com dois parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	126
B.15	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 7 com dois parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	126

B.16	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 8 com dois parâmetros – Guy <i>et al.</i> (1966)	127
B.17	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com três parâmetros – Samaga <i>et al.</i> (1986)	127
B.18	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com três parâmetros – Samaga <i>et al.</i> (1986)	127
B.19	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 3 com três parâmetros – Samaga <i>et al.</i> (1986)	128
B.20	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 4 com três parâmetros – Samaga <i>et al.</i> (1986)	128
B.21	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com dois parâmetros – Samaga <i>et al.</i> (1986)	128
B.22	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com dois parâmetros – Samaga <i>et al.</i> (1986)	129
B.23	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 3 com dois parâmetros – Samaga <i>et al.</i> (1986)	129
B.24	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 4 com dois parâmetros – Samaga <i>et al.</i> (1986)	129
B.25	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 1 com três parâmetros – Cavalcante (1992)	130
B.26	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com três parâmetros – Cavalcante (1992)	130
B.27	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 1 com três parâmetros – Cavalcante (1992)	130
B.28	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com três parâmetros – Cavalcante (1992)	131
B.29	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> – Mistura 1 com dois parâmetros – Cavalcante (1992)	131
B.30	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com dois parâmetros – Cavalcante (1992)	131
B.31	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 1 com dois parâmetros – Cavalcante (1992)	132

B.32	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com dois parâmetros – Cavalcante (1992)	132
B.33	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 2 com dois parâmetros – Cavalcante (1992)	132
B.34	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 1 com três parâmetros – Julien & Raslan (1998)	133
B.35	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 2 com três parâmetros – Julien & Raslan (1998)	133
B.36	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 3 com três parâmetros – Julien & Raslan (1998)	133
B.37	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 1 com dois parâmetros – Julien & Raslan (1998)	134
B.38	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 2 com dois parâmetros – Julien & Raslan (1998)	134
B.39	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 3 com dois parâmetros – Julien & Raslan (1998)	134
B.40	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com três parâmetros – Samaga <i>et al.</i> (1986)	135
B.41	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com dois parâmetros – Samaga <i>et al.</i> (1986)	135
B.42	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com três parâmetros – Cavalcante (1992)	135
B.43	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com dois parâmetros – Cavalcante (1992)	136
B.44	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com três parâmetros – Cavalcante (1992)	136
B.45	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com dois parâmetros – Cavalcante (1992)	136
B.46	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> com dados agrupados – Canais de Laboratório com três parâmetros	137

B.47	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para <i>ripples</i> com dados agrupados – Canais de Laboratório com dois parâmetros	137
B.48	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados – Canais de Laboratório com três parâmetros	137
B.49	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados – Canais de Laboratório com dois parâmetros	138
B.50	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados – Canais de Laboratório com três parâmetros	138
B.51	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados – Canais de Laboratório com dois parâmetros	138
B.52	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados – Canais de Laboratório excluindo os dados obtidos por Guy <i>et al.</i> (1966) no canal de 0,61 m de largura com três parâmetros	139
B.53	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados – Canais de Laboratório excluindo os dados obtidos por Guy <i>et al.</i> (1966) no canal de 0,61 m de largura com dois parâmetros	139
B.54	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,30$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros	139
B.55	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,40$ mm) – Canais de Laboratório – três parâmetros	140
B.56	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,50$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros	140

B.57	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,60$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros	140
B.58	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,30$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros	141
B.59	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,40$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros	141
B.60	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,50$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros	141
B.61	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,60$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros	142
B.62	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,20$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros	142
B.63	– Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,30$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros	142
B.64	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,40$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros	143
B.65	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,50$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros	143
B.66	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,20$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros	143
B.67	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,30$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros	144

B.68	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,40$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros	144
B.69	Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,50$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros	144

LISTA DE TABELAS

3.1	Relação dos dados utilizados	37
3.2	Relação dos dados de misturas unimodais, agrupados conforme a forma do leito	41
3.3	Dados básicos obtidos por Srinivasan (1969)	45
4.1	Coefficientes de regressão da equação (4.1) com três parâmetros adimensionais, obtidos com os diversos dados	54
4.2	Coefficientes de regressão da equação (4.2) com dois parâmetros adimensionais, obtidos com os diversos dados	58
4.3	Coefficientes de regressão da equação (4.1) com três parâmetros adimensionais para dados agrupados	62
4.4	Coefficientes de regressão da equação (4.2) com dois parâmetros adimensionais para dados agrupados	63

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE SÍMBOLOS	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xix

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	1
------------	---

CAPÍTULO II

RESISTÊNCIA HIDRÁULICA DOS CANAIS ALUVIAIS	5
2.1 Característica e classificação do escoamento	5
2.2 Variáveis que afetam o comportamento dos canais aluviais	6
2.3 Propriedades físicas dos sedimentos	7
2.4 Início do movimento de partículas não coesivas em leitos aluviais.	8
2.5 Igual mobilidade das partículas	9
2.6 As Formas do leito	11
2.7 A influência da presença de sedimentos no fluxo	15
2.8 A Resistência ao fluxo	17
2.8.1 A Repartição da resistência ao fluxo	21

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Considerações iniciais	27
3.2 Funções de resistência	27
3.3 Dados utilizados	34
3.4 Tratamento dos dados	49

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 Considerações iniciais	51
4.2 A variação do parâmetro de resistência B	51
4.2.1 Resultados obtidos através dos dados coletados por Siqueira (1997)	64
4.2.2 Resultados obtidos através dos dados coletados por Guy <i>et al.</i> (1961)	75
4.2.3 Resultados obtidos através dos dados coletados por Srinivasan (1969)	88
4.2.4 Resultados obtidos através dos dados coletados por Samaga <i>et al.</i> (1986)	89
4.2.5 Resultados obtidos através dos dados coletados por Cavalcante (1992)	90
4.2.6 Resultados obtidos através dos dados coletados por Julien & Raslan (1998)	91
4.2.7 Resultados obtidos através dos dados coletados por Medeiros (1999)	91
4.2.8 Resultados obtidos através dos dados coletados por Karim (1995, 1999)	99
4.2.9 Resultados obtidos após o agrupamento dos dados de todos os canais de laboratório	104
4.2.10 Resultados obtidos após o agrupamento dos dados de rios e canais de laboratório	105
4.2.11 Resultados obtidos após o agrupamento dos dados por faixa de diâmetro mediano	106
4.3 Discussão final dos resultados	107

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	110
5.1 Conclusões	110
5.2 Recomendações	111

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
-----------------------------------	------------

ANEXOS	118
---------------	------------

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Na natureza a água circula através de sistemas naturais e em sua fase terrestre é transportada normalmente, sem a utilização de obras hidráulicas, por riachos, ribeirões e rios oferecendo diversas formas para o seu aproveitamento. O conhecimento sobre o efeito que a presença de sedimentos no fluxo causa sobre a velocidade do escoamento ainda continua sendo um desafio para os cientistas.

Em 1786, Du Buat (Graf, 1984) publicou um tratado sobre rios incluindo resultados sobre velocidade de escoamento e o transporte de sedimentos, discutindo a formação e migração de bancos de areia, a estabilidade das seções transversais e diversas equações do movimento uniforme. Uma das grandes contribuições de Du Buat para a área de transporte de sedimentos foi o conceito de resistência ao cisalhamento. Ao longo de todo o século XIX foram desenvolvidas as principais fórmulas de resistência iniciando com a fórmula de Antoine Chézy que passou a ser utilizada em 1897. Seguiram-se os trabalhos de Darcy, Bazin, Ganguillet, Kutter e Manning cuja fórmula é bastante utilizada atualmente. Durante a primeira metade do século XX importantes conceitos teóricos foram desenvolvidos principalmente no domínio dos escoamentos turbulentos e suas interações com a resistência e a perda de carga em rios e canais. Deve-se a Prandtl a introdução do conceito de camada limite e a partir deste conceito os estudos seguintes de Von Kármán, Nikuradse e Schlichting permitiram equacionar os problemas de resistência e perda de carga tanto para rios como para encanamentos.

O escoamento pode ocorrer em rios ou canais artificiais. Os rios possuem fronteiras móveis ou erodíveis e os canais artificiais têm fronteiras rígidas quando revestidos. Os canais que possuem fronteiras móveis se caracterizam pela presença de sedimentos em movimento no fluxo, quer seja junto ao leito do canal ou em suspensão no fluxo. Os canais que têm fronteiras rígidas são aqueles em que o leito e as margens são compostos por materiais que, sob as condições de projeto, não sofrem erosão por ação do fluxo.

A presença de sedimentos nos cursos de água naturais e em canais de laboratório, tanto em suspensão quanto no leito, introduz um conjunto de problemas. A tentativa da

descrição do fluxo nos rios como ele realmente se apresenta através de um escoamento bifásico com superfície livre sobre fronteiras deformáveis fornece uma idéia dos desafios que este escoamento representa para descrever o fluxo pelos conceitos da Engenharia Hidráulica e Mecânica dos Fluidos.

No fluxo em rios com leitos erodíveis existe uma forte inter-relação física entre a resistência devido ao atrito com o leito, a taxa de transporte de sedimentos e a configuração geométrica assumida pela superfície do leito chamada de forma do leito. As mudanças nas formas do leito resultam da interação entre o fluxo, o fluido e o material do leito além da interdependência entre as variáveis envolvidas. A análise da resistência total e sua previsão em canais erodíveis são extremamente complexas. Outro aspecto importante que vem sendo estudado por diversos pesquisadores ao longo do tempo é a previsão da ocorrência dos diversos tipos de formas do leito. Segundo Vanoni (1984) os engenheiros hidráulicos que estudavam as mudanças no comportamento dos rios atribuíam tal mudança à variação da resistência no curso d'água, mas não associavam tal variação da resistência com as formas do leito.

A complexidade das configurações das formas do leito em canais aluviais continua a desafiar os engenheiros e cientistas. O grande número de parâmetros que descrevem as complexas interações entre as partículas de sedimentos e as forças hidrodinâmicas presentes no fluxo contribuem para a falta de um completo entendimento da resistência oferecida ao fluxo devido às formas do leito.

As variáveis relacionadas com a capacidade de transporte são mais sujeitas à análise matemática e previsão. Essa capacidade do fluxo para transportar partículas sólidas, faz com que a geometria do leito do canal mude, o que significa uma alteração na resistência oferecida ao fluxo, que por sua vez altera a capacidade de transporte num ajuste contínuo até o estabelecimento de uma condição de equilíbrio [Srinivasan (1969), Parker e Anderson (1979), Bennett (1997)]. Nesta condição de equilíbrio são satisfeitas, simultaneamente, duas relações: a relação do transporte sólido e a relação da resistência ao fluxo. A grande maioria das pesquisas realizadas na área de transporte de sedimentos tenta investigar estas duas relações.

No desenvolvimento dessas relações, além dos dados de campo, são utilizados também dados de experimentos de laboratório com sedimentos, que podem ser uniformes. No entanto, os sedimentos naturais são tipicamente não uniformes. Nas equações de transporte e de resistência, o parâmetro comumente utilizado para representar o tamanho dos sedimentos que compõem o leito e as margens do canal é o diâmetro mediano D_{50} , que corresponde ao tamanho para o qual 50% dos sedimentos têm diâmetro inferior ou superior. Este e outros

parâmetros [Bennett (1995, 1997)] referentes aos sedimentos, uniformes ou não, são obtidos a partir da curva granulométrica, que permite uma definição da distribuição da mistura. James (1990) e Yalin & Karahan (1979) desenvolveram um trabalho que mostra a influência da não uniformidade dos sedimentos no processo de erosão. O diâmetro representativo de uma mistura de sedimentos é uma questão sem resposta definitiva na literatura [Simons e Senturk (1976)]. Por esta razão, em função do fenômeno estudado, diferentes tamanhos de partículas têm sido propostos como representativos por diferentes pesquisadores. Einstein (1950) introduziu dois diâmetros como representativos: D_{35} para o cálculo do transporte sólido e D_{65} para o cálculo da resistência ao fluxo. Simons e Richardson (1962) usaram D_{85} para o cálculo da resistência ao fluxo e Schoklitsch (1950) usou D_{40} para representar a mistura. Em resumo, a distribuição granulométrica de sedimentos tem um papel importante na definição da resistência dos canais aluviais.

Em condições de equilíbrio, a quantidade de sedimentos erodidos do leito num dado intervalo de tempo, deve ser igual à quantidade depositada no mesmo intervalo de tempo, de modo a garantir a estabilidade da calha fluvial.

Considerando uma situação de fluxo turbulento num canal aluvial ou não com o leito plano, a resistência total oferecida ao fluxo é devido ao atrito superficial com os grãos do material que compõe o leito também conhecido como arrasto superficial. No caso de um leito erodível, tão logo os grãos sejam colocados em movimento, o leito se deformará e surgirão as formas do leito. Em consequência dessas deformações no leito, surge um componente adicional de resistência conhecido como arrasto de forma.

Einstein e Barbarossa (1952) apresentaram duas relações para resolver o problema da determinação de cada parcela da resistência total ao fluxo com fronteiras móveis na presença das formas do leito. A primeira relação é baseada na equação logarítmica da distribuição de velocidade proposta por Keulegan (1938). A segunda relação funcional relaciona o arrasto de forma ao transporte de sedimentos. Einstein e Barbarossa (1952) propuseram a divisão do raio hidráulico em duas partes, uma relativa à resistência do grão e outra relativa às formas do leito.

Chien & Wan (1999) afirmaram que a separação da resistência total através da separação do raio hidráulico proposta por Einstein e Barbarossa (1952) deve ser utilizada como uma alternativa e não como uma aplicação universal. Chien & Wan (1999) argumentam que se as formas do leito causam a redução do contato direto entre o fluxo e o leito, conseqüentemente causam uma redução na resistência do grão e vice-versa. Em vez de utilizar a repartição da resistência relativa ao grão e às formas do leito, considerando a

existência de dois raios hidráulicos. Engelund (1966) e Smith & McLean (1977) sugeriram uma alternativa para a separação da resistência total usando uma repartição da declividade da linha de energia.

Outras pesquisas como as realizadas por Karim (1995), Yu & Lim (2003) e Wu & Wang (1999), propuseram uma melhor estimativa da tensão de cisalhamento do leito por ajustes com o coeficiente de Manning utilizando análise dimensional ou técnicas de regressão.

Yang *et al.* (2005) analisaram a resistência ao fluxo e a geometria da forma do leito em um canal largo considerando a repartição da resistência relativa ao grão e a forma do leito propondo uma equação para representar a tensão de cisalhamento total sobre o leito como uma função da rugosidade dos grãos e da forma do leito. Yang *et al.* (2005) concluíram através da base de dados utilizados que a rugosidade do grão era igual a duas vezes o tamanho mediano do sedimento do leito. A influência do comprimento e altura das formas do leito sobre a tensão de cisalhamento total e a declividade da linha de energia foi analisada e expressões empíricas para o comprimento da zona de separação entre as formas do leito também foram propostas.

Apesar de esta prática ser muito utilizada por diversos pesquisadores, não existe ainda uma metodologia totalmente confiável e segura que nos permita a previsão da resistência, o que propicia também um alto grau de dificuldade para a previsão das taxas de transporte sólido para uma dada condição de escoamento.

O presente trabalho tem o objetivo de propor uma função da resistência total para canais aluviais associada a cada forma do leito, além de investigar a influência da distribuição granulométrica de uma mistura de sedimentos sobre a resistência total. A partir da equação fundamental da resistência da superfície, é definida uma relação cuja variação pode ser associada aos efeitos da forma do leito e à distribuição granulométrica de sedimentos. A variação desta função, obtida através de análise dimensional utilizando a técnica de regressão linear múltipla, é apresentada para sedimentos unimodais e bimodais associada a cada tipo de canal e forma do leito. Para atingir o objetivo deste trabalho foram utilizados dados experimentais de laboratório e de campo coletados por diversos pesquisadores e órgãos governamentais.

CAPÍTULO II

RESISTÊNCIA HIDRÁULICA DOS CANAIS ALUVIAIS

2.1 – Características e classificação do escoamento

As características fundamentais nos escoamentos em canais artificiais e rios é que eles se apresentam como escoamentos com superfície livre e com grande susceptibilidade aos efeitos da gravidade, que representa a força motriz para este tipo de escoamento.

Os escoamentos com superfície livre podem apresentar variações contínuas de suas grandezas tanto no espaço como no tempo. A cota de um rio pode variar no espaço e no tempo devido à alternância dos processos de erosão e assoreamento. Os rios são sistemas dinâmicos que continuamente estão mudando sua forma e posição, como uma consequência de forças hidráulicas agindo sobre seu leito e margens. Quando o canal de um rio é modificado numa determinada seção ou trecho, frequentemente esta alteração implica em mudanças nas características do canal, tanto a montante como a jusante de um determinado trecho. Neste caso, uma nova condição de equilíbrio tende a ser alcançada pelo sistema.

A declividade do leito do canal tem um papel fundamental na natureza do fluxo. Quando as condições do fluxo não variam no decorrer do tempo em uma mesma seção diz-se que o escoamento se encontra em regime permanente. Este regime de escoamento pode ser verificado em rios durante o período de estiagem aonde a única contribuição possível ao leito vem dos lençóis subterrâneos, que se caracterizam por variações temporais muito lentas, e isto pode garantir um nível e uma vazão aproximadamente constantes em uma mesma seção ao longo de um determinado intervalo de tempo e através da regularização de vazões em rios devido à operação de reservatórios que pode garantir ou impor um nível e uma vazão constantes. Se as condições de fluxo numa dada seção variarem ao longo do tempo o fluxo é caracterizado como não permanente. Este é o padrão mais comum dos regimes de escoamentos em rios e áreas naturais onde as grandezas variam no espaço e no tempo apresentando numa mesma seção um período de ascensão e um período de recessão, sendo comumente conhecidas como ondas de cheia além das ondas de translação geradas pelas operações das usinas hidroelétricas, pela operação de eclusas de navegação, pela ruptura de barragens ou pelas ondas de marés nos estuários. Segundo Silva *et al.* (2003), a característica

principal destas ondas é que elas se classificam como ondas longas em águas rasas. Por definição, esta classificação ocorre quando o comprimento da onda, L , é sempre superior a vinte vezes a profundidade h do fluxo, e este é requisito comprovadamente observado em rios. Se a declividade da linha de energia e a superfície livre do fluido têm a mesma declividade do fundo do canal, o escoamento é uniforme. Quando as declividades do canal, da linha de energia e da superfície do fluido são diferentes, o escoamento é variado. O escoamento permanente e uniforme ocorre geralmente nos canais construídos pelo homem. Nos cursos de água naturais geralmente os escoamentos são caracterizados como não uniformes. Entretanto, em algumas situações específicas podemos observar a condição de fluxo praticamente permanente e uniforme em rios, principalmente em seções estáveis, retilíneas e com baixas profundidades de fluxo e vazão. Neste trabalho, os dados obtidos por diversos pesquisadores tanto para canais de laboratório quanto para rios praticamente estavam na condição de escoamento permanente e uniforme.

2.2 – Variáveis que afetam o comportamento dos canais aluviais

São várias as variáveis que afetam o comportamento de canais aluviais e se inter-relacionam. Sua natureza é tal que, diferente de problemas hidráulicos de fronteiras rígidas, não é possível isolar e estudar o papel de qualquer variável individualmente pois existe uma grande dificuldade em relacioná-las matematicamente. Devido a isto, constitui-se um tratamento normal listar as variáveis mensuráveis que efetivamente descrevem os processos envolvidos e, através de considerações simplificadas e válidas, obter equações básicas para descrever o sistema físico.

De uma maneira geral, estas variáveis podem ser divididas em dois grupos:

- a) Variáveis relacionadas com as condições de erosão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica tais como: tamanho, forma, peso específico, velocidade de sedimentação, coesão, geologia e topografia da bacia hidrográfica, características da estação chuvosa, condições de solo e cobertura vegetal;
- b) Variáveis relacionadas com a capacidade do fluxo para transportar sedimentos, tais como: profundidade, largura, forma e alinhamento do rio, declividade, rugosidade, raio hidráulico, descarga, velocidade, turbulência, força de cisalhamento e propriedades do fluido.

Nem todas estas variáveis são independentes e, de acordo com o fenômeno estudado, os efeitos de determinadas variáveis não são completamente conhecidos. As variáveis que estão relacionadas com a produção de sedimentos nas bacias são sujeitas a muitas variações

que dificultam as análises e previsões quantitativas de qualquer problema específico. Já as variáveis relacionadas com a capacidade do fluxo para transportar sedimentos são mais sujeitas a análises matemáticas e previsões.

As principais variáveis envolvidas nas análises do fluxo em canais aluviais podem ser relacionadas genericamente numa forma funcional como:

$$f(V, d, S, \rho, w, g, D, \sigma, \rho_s, K_r, K_s) = 0 \quad (2.1)$$

na qual V é a velocidade média de fluxo, d é a profundidade média do fluxo, S é a declividade da linha de energia, ρ é a massa específica da água, w é a velocidade de queda do material do leito, g é a aceleração gravitacional, D é o diâmetro representativo do material do leito, σ é uma medida da distribuição granulométrica do material do leito, ρ_s é a massa específica dos sedimentos que compõem o leito, K_r é um fator de forma para o trecho do canal em estudo e K_s é um fator de forma para a seção transversal do canal.

2.3 - Propriedades físicas dos sedimentos

Os sedimentos podem ser classificados, de uma maneira geral, como coesivos e não-coesivos. A resistência à erosão de sedimentos coesivos depende do comprimento da fronteira coesiva ligando as partículas. Os sedimentos não-coesivos consistem, geralmente, de partículas maiores do que os sedimentos coesivos.

O comportamento hidráulico das partículas de sedimentos não-coesivos é afetado por propriedades físicas tais como tamanho, forma, densidade e velocidade de queda das partículas. Os aluviões de terraços fluviais são, principalmente, sedimentos compostos por minerais de quartzo e feldspato. Estes minerais têm uma densidade em torno de 2,65. Por esta razão, neste trabalho, esse valor foi assumido para a densidade das partículas de sedimentos.

A forma de uma partícula influi consideravelmente em seu comportamento dinâmico. Os parâmetros de forma mais utilizados em estudos com sedimentos são a esfericidade e o fator de forma. A esfericidade foi definida em 1932 por Wadell [Siqueira (1997)], como a razão entre a área superficial de uma esfera de mesmo volume que a partícula e a área superficial verdadeira da partícula. Este parâmetro ajuda a descrever principalmente o movimento relativo entre a partícula em queda e o fluido. Estudos realizados por McNown e Inalaika [Siqueira (1997)] concluíram que o fator de forma (β) é calculado por:

$$\beta = \frac{c_m}{\sqrt{a_i b_i}} \quad (2.2)$$

Na equação acima, a_i , b_i e c_m são os comprimentos dos eixos mais longo, intermediário e menor da partícula, respectivamente.

A velocidade de queda de uma partícula é uma variável primária na definição da interação entre o transporte de sedimentos e o leito, margens e partículas em suspensão. Esta variável depende, basicamente, da massa específica e viscosidade do fluido além do tamanho, forma, massa específica e rugosidade da partícula de sedimento. A velocidade terminal de queda de uma partícula num fluido depende da força resultante considerando seu peso submerso e a força resistiva de arrasto do fluido.

O tamanho da partícula de sedimento é a propriedade de maior importância no estudo de problemas relacionados com sedimentos, principalmente pelo fato de outras propriedades tais como a velocidade de queda e a forma variarem com o tamanho da partícula. Os sedimentos naturais são tipicamente não uniformes, isto significa que são formados de muitas partículas com diferentes tamanhos. Torna-se necessário, então, fazer uma análise estatística desta característica, a partir de um número adequado de amostras de modo a definir completamente as características de qualquer mistura de sedimentos como um todo.

2.4 - Início do movimento de partículas não coesivas em leitos aluviais

Em um leito composto por sedimentos uniformes, o início do movimento em todas as partes do leito, é considerado como a condição crítica para o início do transporte. Com as misturas, a situação é diferente, em que os sedimentos menores sofrem a proteção dos sedimentos maiores, fazendo com que os sedimentos mais grossos iniciem o movimento antes do que os sedimentos mais finos.

Segundo Wiberg & Smith (1987) devido aos diversos efeitos, como o engrossamento do leito, a proteção dos sedimentos menores por maiores, etc, é difícil se estabelecer um critério para a mistura como um todo. Neste caso é comum considerar cada fração do tamanho do sedimento separadamente com a condição própria do movimento [Srinivasan (1992)].

O início do movimento das partículas do leito geralmente é associado com equações de velocidade crítica ou de tensão de cisalhamento crítica. Em 1936 Shields estabeleceu uma relação gráfica para determinar a tensão de cisalhamento crítica. Pesquisas de Yalin & Karaham (1979), James (1990) e Mantz (1977) ampliaram o escopo da curva de Shields, mas o critério original de Shields continua sendo utilizado amplamente.

Após o início do movimento das partículas pela ação do fluxo observa-se que o leito começa a deformar e depois de um certo tempo todo o leito poderá estar coberto por um padrão de irregularidades, conhecidas como as formas do leito [Srinivasan (1992)].

2.5 – Igual mobilidade das partículas

Recentemente, diversos estudos que abordam o problema do movimento incipiente de grãos numa mistura têm sido concluídos. Em diversos casos foi encontrado que a maioria dos tamanhos, num leito de sedimentos composto por grãos de vários tamanhos, começam a ser movimentados em torno da mesma tensão de cisalhamento no leito. Este resultado ficou conhecido como *igual mobilidade* das partículas e tem sido obtido tanto em estudos de laboratório quanto em estudos de campo.

Pesquisa realizada por Wilcock & Southard (1989) mostra a igual mobilidade das partículas como um importante resultado adicional. O objetivo deste trabalho foi determinar um parâmetro de tamanho relativo, D_i/D_{50} , suficiente para descrever os efeitos do tamanho dos grãos na tensão de cisalhamento crítica. Neste estudo, as condições de movimento inicial ou tensão de cisalhamento crítica das frações individuais τ_{ci} numa mistura de sedimentos, foi estimada como a tensão de cisalhamento no leito que produz uma pequena taxa de transporte para cada fração. Dessa forma, foi definida a tensão de cisalhamento no leito nas condições de movimento incipiente ou tensão de cisalhamento de referência τ_{ri} .

A Figura 2.1 mostra os resultados obtidos por Wilcock & Southard (1989) e outros pesquisadores. No gráfico que relaciona τ_{ri} versus D_i/D_{50} observa-se a mesma linha de tendência para as misturas com suas declividades variando entre -0,97 e -1,06, o que significa que todas as frações da mistura cruzam o nível de transporte de referência na mesma tensão de cisalhamento dimensional no leito τ_0 . Se a taxa de transporte de referência é análoga à tensão de cisalhamento crítica para cada fração, verifica-se que todas as frações começam a serem movimentadas na mesma tensão de cisalhamento dimensional do leito.

Andrews e Erman trabalharam com dados do rio Sagehen Creek, um pequeno rio com leito composto por pedregulho, situado na Califórnia. Os resultados deles sugerem que a condição de igual mobilidade é quase perfeita para este leito, um resultado consistente com resultados de outras análises de rios com leitos pedregulhosos [Siqueira (1997)].

Um tratamento comum nos estudos citados anteriormente tem sido que a distribuição granulométrica do material do leito é unimodal e aproximadamente log-normal. A distribuição granulométrica dos sedimentos do leito de muitos rios, particularmente aqueles que contêm areia e pedregulho, se afasta significativamente da log-normal. Em muitos casos, as distribuições granulométricas dos rios com leitos de areia e pedregulho possuem características distintamente bimodais ou multimodais. Uma distribuição granulométrica

bimodal é definida aqui como aquela que tem duas modas com uma significativa queda nos percentuais de sedimentos nas peneiras de tamanhos entre eles.

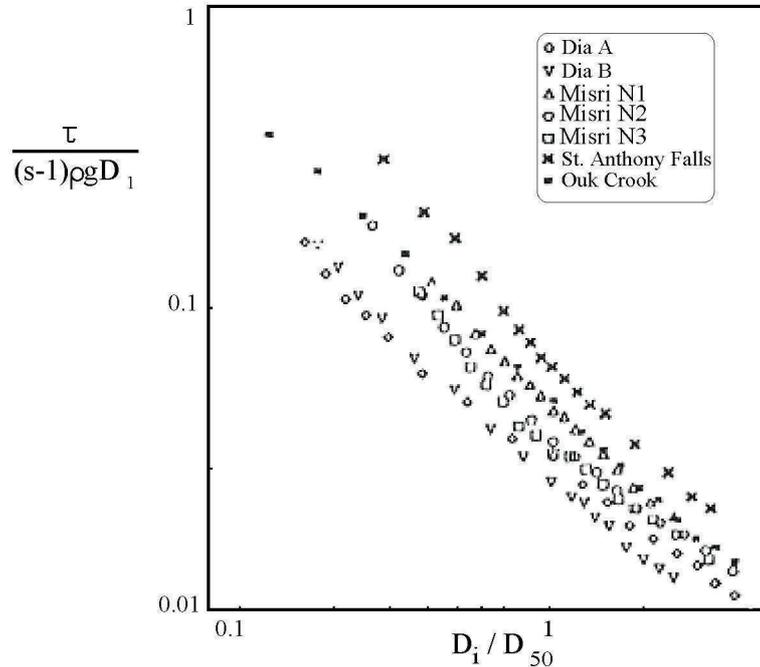


Figura 2.1 – Valores da tensão de cisalhamento crítica de referência τ_{ri} em função da razão D_i/D_{50} com outros sedimentos [Wilcock & Shoutard (1989)].

Wilcock & Mcardell (1993) estudaram a tensão de cisalhamento crítica de frações individuais τ_{ci} em 14 sedimentos unimodais e levemente bimodais, os resultados obtidos mostram pouca variação de τ_{ci} com o tamanho médio dos grãos da mistura. Para sedimentos fortemente bimodais, τ_{ci} aumenta com o tamanho do grão, um resultado aparente de uma segregação lateral das frações mais finas e mais grossas sobre a superfície do leito. Com o objetivo de quantificar e considerar o efeito da bimodalidade da mistura sobre τ_{ci} , Wilcock propõe um parâmetro de bimodalidade B_m definido como:

$$B_m = \left(\frac{D_c}{D_f} \right)^{1/2} \sum P_m \quad (2.5)$$

em que D_c e D_f são os tamanhos dos grãos dos modos grosso e fino em sedimentos bimodais, respectivamente. O termo $\sum P_m$ representa a soma das proporções de sedimento em cada modo. Para misturas puramente bimodais seu valor é unitário. Os resultados mostram que para valores de B_m menores do que 1,7 (que incluem todos os sedimentos unimodais), todos os valores de τ_{ci} mostram pouca variação com o tamanho da fração. Para maiores

valores de B_m , τ_{ci} aumenta numa forma log-linear com D_i/D_m variando a declividade desta relação diretamente com o valor de B_m .

Kuhnle (1993) realizou experimentos em laboratório investigando o movimento incipiente de misturas de areia e pedregulho. Foram utilizadas cinco misturas tendo as seguintes razões percentuais de pedregulho: 0:100; 10:90; 25:75; 45:55; 100:0. Cada mistura foi dividida em doze frações de tamanhos individuais. Os resultados mostram que a tensão de cisalhamento dos sedimentos bimodais aumenta com o aumento no tamanho do grão. Nos experimentos onde o leito era composto por 100% de pedregulho, todas as frações começaram a se movimentar, aproximadamente, com a mesma tensão de cisalhamento no leito (todos os valores dentro de $\pm 10\%$ do valor médio). Kuhnle (1993) argumenta que o aumento da tensão de cisalhamento crítica no leito com o aumento no tamanho dos sedimentos bimodais, pode ter sido causado pela presença de grande quantidade de areia que pode ter inibido a formação de uma camada superficial grossa do leito. Os valores da tensão de cisalhamento crítica para as frações de areia e pedregulho no leito de sedimentos aumentaram. Isto ocorreu presumivelmente devido ao aumento na rugosidade da superfície do leito provocado pelo aumento na quantidade de pedregulhos. As curvas de tensão de cisalhamento de referência para os tamanhos de areia em cada série de experimentos foram aproximadamente horizontais, tanto nos experimentos com 100% de areia quanto naqueles com misturas bimodais contendo areia e pedregulho.

2.6 – As formas do leito

Uma vez alcançada a condição crítica a partir da qual as partículas de sedimentos iniciam o movimento pelo fluxo, observa-se que o leito que era inicialmente plano, começa a se deformar e depois de um certo tempo todo o leito estará coberto por um certo padrão de irregularidades, conhecidas como as formas do leito, como já foi dito anteriormente. Pela forma geométrica, elas são identificadas como *ripples*, dunas, transição, leito plano e antidunas (Simons & Richardson, 1962).

A Figura 2.2 mostra um esquema geral destas formas do leito. Esta seqüência de formas do leito ocorre, para materiais com D_{50} igual ou inferior a 0,6 mm à medida que a tensão de cisalhamento no leito aumenta. Para materiais mais grossos, *ripples* não foram observados e esta seqüência se inicia com a formação de dunas.

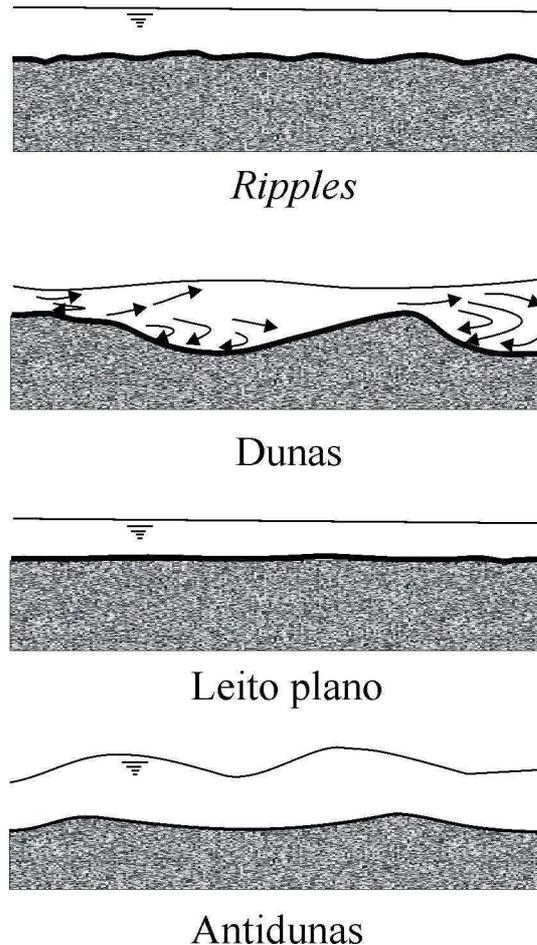


Figura 2.2 – Esquema geral das formas do leito.

Os *ripples* são pequenas deformações triangulares com aproximadamente 0,30 m de comprimento e altura variando entre 0,01 e 0,06 m. São formados apenas em sedimentos finos e não são observados em sedimentos de tamanho maior do que 0,6 a 0,7 mm. A altura dos *ripples* não é afetada pela profundidade do fluxo (Simons & Richardson, 1962).

As dunas são irregularidades, bem maiores e de forma triangular. A declividade a montante da crista é suave e a jusante tem inclinação igual à do ângulo de repouso dos sedimentos que compõem a mistura. As dunas se movem para jusante com uma velocidade maior do que a dos *ripples*.

Com o aumento da tensão de cisalhamento, as dunas começam a desaparecer lentamente e nesta fase de transição é possível observar irregularidades no processo de erosão. Simons & Richardson (1962) consideram esta fase também como uma forma do leito, mas é apenas transitória e portanto não deve ser considerada como uma forma do leito específica [Srinivasan (1969)].

O leito plano não possui nenhuma forma e acontece com altas taxas de transporte e está associado a altas tensões de cisalhamento. O leito plano artificial antes do início do movimento das partículas não se enquadra nesta condição.

Após a formação do leito plano, um aumento da tensão de cisalhamento provoca a aproximação dos escoamentos crítico e supercrítico. Nesta situação, formam-se ondulações sinusoidais semelhantes e próximas das ondas de superfície. A ocorrência desta forma do leito denominada de antidunas é rara na natureza.

Outro aspecto importante que vem sendo objeto de muitas pesquisas ao longo dos anos é a previsão da ocorrência das formas do leito. Desde muito cedo, engenheiros hidráulicos que estudavam a mudança no comportamento dos rios atribuíam tal mudança à variação de resistência no curso d'água, mas não associavam tal variação de resistência com as formas do leito (Vanoni, 1984). Uma associação definitiva entre a resistência e as formas do leito em canais e rios surgiu apenas com estudos com dados de laboratório obtidos por Brooks (1958).

Simons & Richardson (1962) realizaram descrições mais completas das formas do leito tentando desenvolver um critério que permitisse a previsão das condições hidráulicas em que cada forma do leito pudesse ocorrer. Como primeira tentativa, propuseram a distinção entre a ocorrência das diversas formas do leito através do número de Froude mas diversas inconsistências foram apresentadas neste método e logo foi abandonado pelos próprios autores. Posteriormente relacionaram um parâmetro chamado potência do fluxo ($\tau_0 V$), proposto por Bagnold (1956), com o diâmetro mediano dos sedimentos, a velocidade de queda dos sedimentos e a forma do leito, para que não existisse uma dependência do número de Froude para a previsão das formas do leito.

Uma relação empírica e generalizada para a previsão das formas do leito foi apresentada por Znamenskaya (1963) e foi ampliada em 1965 e 1969. Os resultados foram apresentados na forma gráfica em que o número de Froude foi relacionado com a razão entre a velocidade média do fluxo e a velocidade de queda dos sedimentos no leito. No gráfico obtido por Znamenskaya (1963) foram traçadas isolinhas de velocidade de propagação das formas do leito definindo sete regiões, ocorrendo apenas uma forma do leito em cada região.

As condições hidráulicas em que as diversas formas do leito surgem foram alvo de muitas pesquisas no passado e mesmo assim, não se pode afirmar que estas condições são bem definidas [Srinivasan (1992)].

Karim (1995) propõe uma relação gráfica indicada na Figura 2.3 para previsão das formas do leito obtida com dados experimentais de Guy *et al.* (1966) na forma do número de Froude *versus* a profundidade relativa (h/D_{50}), onde h é a profundidade do fluxo e D_{50} o

diâmetro mediano da mistura. As duas linhas indicadas na Figura 2.3 separam a região de transição dos altos e baixos regimes. No baixo regime, *ripples* e dunas se formam e no alto regime, leito plano e antidunas se formam.

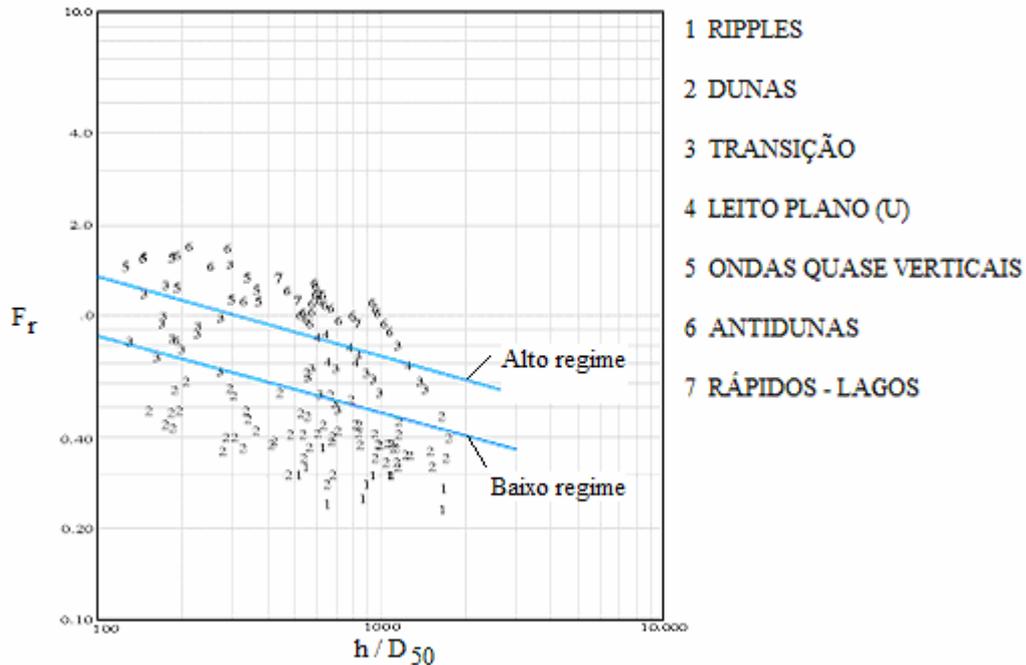


Figura 2.3 – Critério do número de Froude para a previsão das formas do leito.

Os diversos métodos expostos demonstram que ainda não há consenso entre os pesquisadores sobre a utilização de um único método para a previsão das formas do leito. Por este motivo e pelo raciocínio de que as mudanças nas formas do leito são causadas pelas instabilidades no leito, Srinivasan (1969) apresentou um método semi-empírico que em vez de definir zonas ou áreas num gráfico cheio de observações do mesmo tipo de forma do leito, definiu as condições limites para a mudança das formas do leito.

Srinivasan (1969) delimitou graficamente os campos de ocorrência das diversas formas do leito em função dos parâmetros adimensionais $\frac{gD_m^3}{\nu^2}$ e $\frac{u_*D_m}{\nu}$ onde g é a aceleração gravitacional, D_m o diâmetro médio dos sedimentos e ν é a viscosidade cinemática. Considerando o leito plano como o regime estável básico, as outras formas do leito são explicadas como consequência de instabilidades no escoamento sobre o leito plano. Quando a tensão de cisalhamento sobre o leito plano diminui gradualmente, este se torna instável e é substituído por *ripples* ou por dunas, dependendo do tamanho do grão e da viscosidade do fluido. As relações encontradas por Srinivasan (1969) são mostradas na Figura 2.4. A tensão

de cisalhamento crítica mínima no leito plano antes da deformação pode também ser obtida, ainda segundo Srinivasan (1969), das seguintes equações:

$$\frac{u_* D_m}{\nu} = 1,117 \left(\frac{g D_m^3}{\nu^2} \right)^{0,5} - 2,087 \quad (2.6)$$

para dunas, e

$$\frac{u_* D_m}{\nu} = 2,902 \left(\frac{g \cdot D_m^3}{\nu^2} \right)^{0,5} - 1,487 \quad (2.7)$$

para ripples.

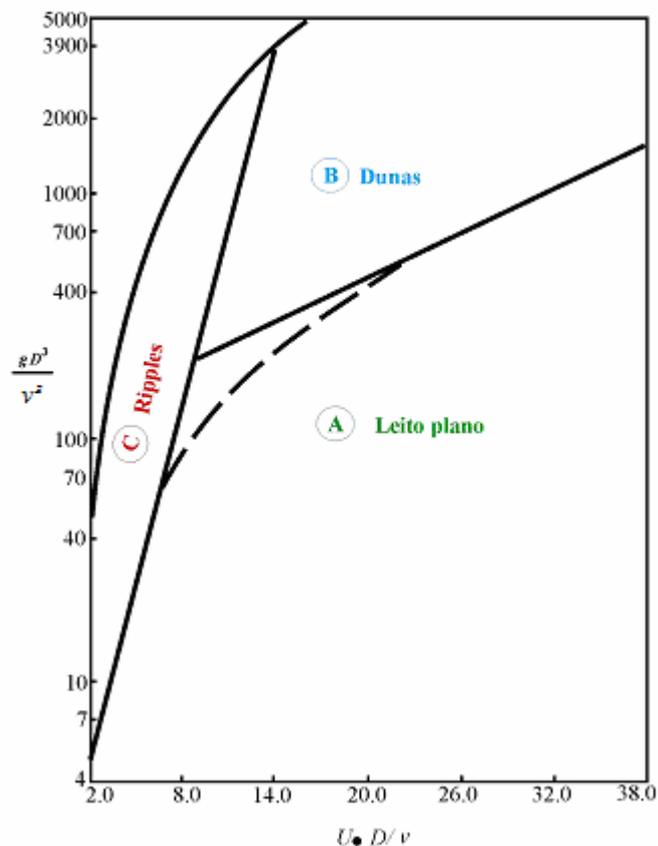


Figura 2.4 – Relação de Srinivasan (1969) para determinação das formas do leito.

2.7 – A influência da presença de sedimentos no fluxo

A presença de sedimentos no fluxo altera as condições de escoamento cujos efeitos são interativos. Os sedimentos em suspensão alteram a viscosidade do fluido tornando o efeito da viscosidade próximo ao leito significativo, podendo até influenciar na ocorrência das formas do leito.

Vanoni (1975), analisando a presença de sedimentos no fluxo, observou a tendência do aumento da velocidade média do fluxo com o aumento da concentração de sedimentos para dois escoamentos com as mesmas características. Baseado nas medições da velocidade em escoamentos com diversas concentrações de sedimentos em suspensão, Vanoni (1975) concluiu que a presença de sedimentos em suspensão amortecia os efeitos da turbulência e afetava a forma de distribuição da velocidade reduzindo o coeficiente de Von Karman.

Estudos de Coleman (1986) afirmam que o coeficiente de Von Karman é mesmo uma constante universal e as variações na distribuição da velocidade são devidas ao efeito da zona de esteira (Srinivasan, 1992).

Van Rijn (1984a) sugere que o coeficiente de Von Karman deve ser considerado como uma função da concentração local dos sedimentos presentes no fluxo. Admitindo-se que a distribuição logarítmica da velocidade seja verificada sem problemas, a presença de sedimentos pode, todavia, introduzir algumas modificações, como o amortecimento da turbulência que pode interferir nos coeficientes da distribuição, através de uma diminuição na constante universal k como mostra a Figura 2.5, a qual indica os valores de k em função de um termo adimensional introduzido por Einstein & Chien (1954), onde C_s é a concentração de grãos com um dado diâmetro, w é a velocidade de queda e U é a velocidade média do escoamento, S é a declividade da linha de energia, ρ é a massa específica da água e ρ_s é a massa específica dos sedimentos [Simons & Sentürk (1992); Silva & Júnior (2005)].

Segundo Vieira da Silva & Peclý (2001) um ajuste realizado para a seção de Manacapuru no rio Solimões, mostrou uma variação de k entre 0,17 e 0,4 (Silva & Júnior, 2005).

Existe ainda a dificuldade de não se conhecer distribuições universais da velocidade para as diversas formas do leito. Ainda existe a polêmica se o valor do coeficiente k obtido por Von Karman permanece constante, com valor de 0,4, quando o fluxo transporta sedimentos em suspensão [Coleman (1981, 1986); Ogihara & Miazawa (1991); Umeyama & Gerritsen (1992); Van Rijn (1984c); Vanoni (1984); Cioffi & Gallerano (1991); Wang (1981); e Wiberg & Smith (1991)].

O entendimento sobre a presença de sedimentos no fluxo necessita ainda de maiores investigações, porém é fato que a distribuição da velocidade é alterada com a presença de sedimentos no fluxo.

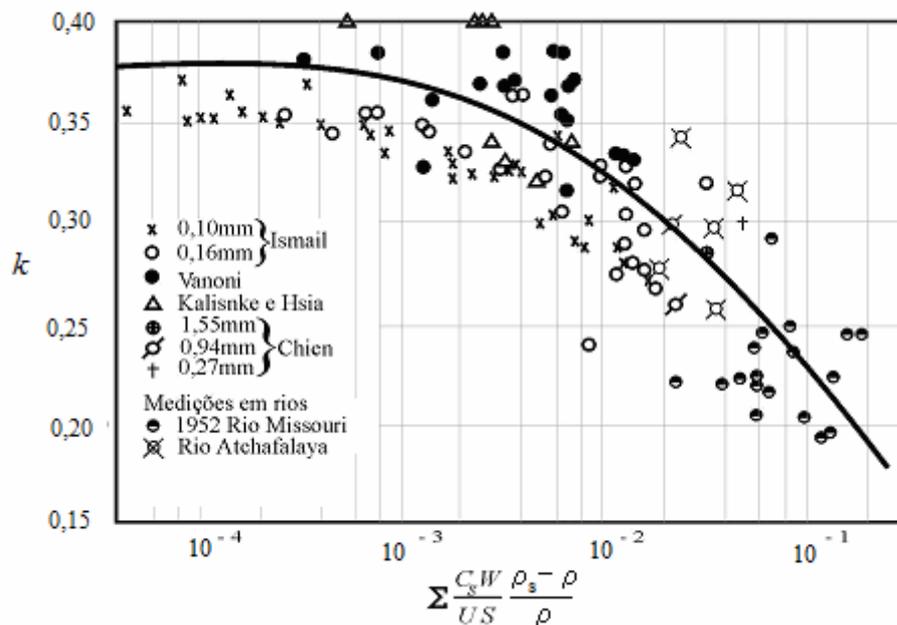


Figura 2.5 - Variação do coeficiente k com a concentração de sedimentos (após Einstein & Chien, 1954).

2.8 – A resistência ao fluxo

Em geral a previsão da resistência ao fluxo para canais com fronteiras rígidas é assumida como uma função apenas do fator de atrito na forma do C de Chézy, n de Manning ou do f de Darcy-Weisbach. Nos canais aluviais, caso existam as formas do leito, a resistência ao fluxo normalmente é considerada através da altura da rugosidade equivalente k_s do grão de areia. Esta resistência devido a rugosidade equivalente é igual à resistência do fluxo devido às formas do leito e às partículas presentes na mistura de sedimentos que compõem o leito.

Lovera & Kennedy (1969), analisando dados disponíveis na literatura de rios e canais de laboratório, desenvolveram um diagrama, similar ao diagrama de Moody em condutos, que expressa o fator de atrito f para fluxos sobre leito plano como uma função da rugosidade relativa e do número de Reynolds.

Considerando uma situação de fluxo turbulento num canal aluvial ou não com leito plano, a resistência total oferecida ao fluxo é devido ao atrito superficial com os grãos do material que compõe o leito, também conhecido como arrasto superficial. No caso de um leito erodível, tão logo os grãos sejam colocados em movimento, o leito se deformará e surgirão as formas do leito. Em consequência dessas deformações no leito, surge um componente adicional de resistência conhecido como arrasto de forma. A avaliação do arrasto de forma é complicada. Isto se deve, segundo Simons & Sentürk (1992), provavelmente porque as

diferentes leis de resistência devem corresponder as diferentes formas do leito. A Figura 2.6 mostra o fator de atrito para fluxos sobre leito plano em canais aluviais obtidos por Lovera & Kennedy (1969).

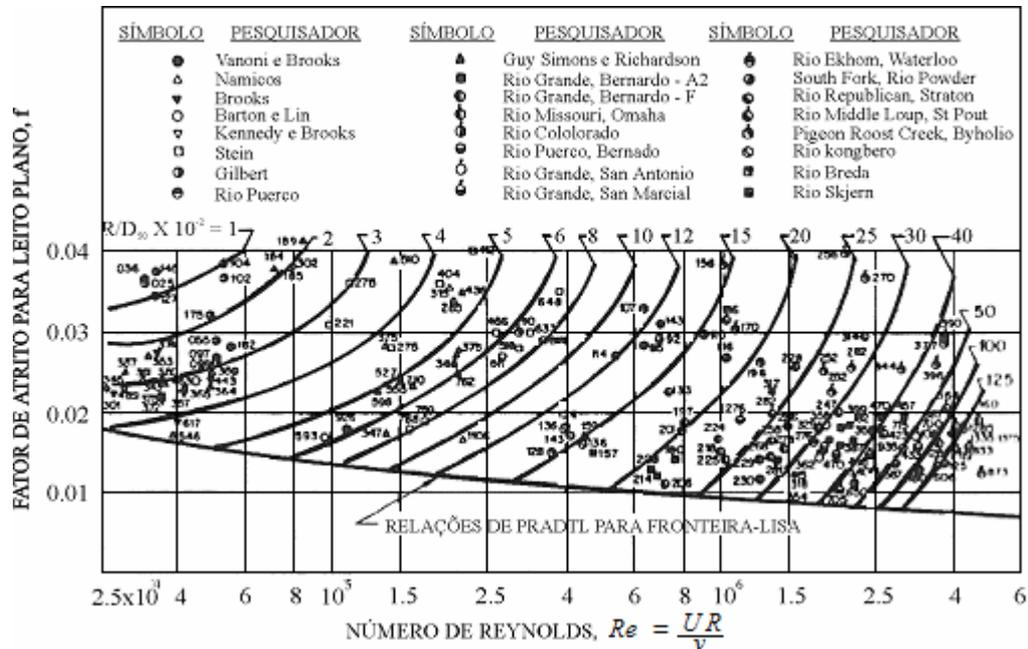


Figura 2.6 – Fator de atrito para fluxos sobre leito plano em canais aluviais, o número de cada ponto é $R/D_{50} \times 10^{-2}$ (após Lovera & Kennedy, 1969).

As grandes variações de resistência em canais aluviais que transportam sedimentos é uma característica distinta deste tipo de canal. Devido a esta variação da resistência, uma compreensão completa dos rios e fenômenos relacionados aos seus comportamentos não é possível até hoje (Srinivasan, 1992). Os fatores que controlam o escoamento em canais aluviais são numerosos e complexos [Graf (1984), Haque & Mahmood (1986), Simons & Sentürk (1976)] dificultando o estabelecimento de uma relação geral para a resistência. Esta relação, porém, determina a interação entre a vazão, a profundidade do fluxo, a declividade da linha de energia e até a geometria da seção. Quase todos os conhecimentos disponíveis sobre a resistência em canais aluviais são fruto de numerosos estudos em laboratório, medições de campo e análises cuidadosas com base na teoria da mecânica dos fluidos.

Os canais de laboratório, que normalmente recirculam uma mistura de água e sedimentos, possuem apenas a possibilidade de modificação de sua seção na vertical através da erosão ou deposição ocorrida no leito. Os rios podem modificar além de sua seção na vertical, o alinhamento e sua seção horizontal, possuindo assim mais de um grau de liberdade do que os canais de laboratório.

Em rios, além das formas do leito apresentadas no item 2.6, existem grandes zonas de erosão e deposição conhecidas como “barras”, que ainda terão outras formas geométricas superpostas nelas. Estas formações afetam significativamente a resistência no leito dos rios (Srinivasan, 1992). Todas as investigações sobre a resistência dos canais aluviais atribuem uma grande variação de um fator de atrito para o crescimento, mudança e desaparecimento das formas do leito. No presente estudo, são considerados apenas os efeitos das formas do leito que ocorrem em canais de laboratório ou em um trecho retilíneo de um rio. No entanto, existem diferenças fundamentais entre estes dois tipos de canais aluviais. No canal de laboratório, a declividade é variável, as paredes laterais não são erodidas pela ação do fluxo e a rugosidade do fundo e das paredes laterais são diferentes em termos da rugosidade da superfície.

Nos escoamentos sub-críticos, o aparecimento de *ripples* ou dunas ocorre com o início do transporte de sedimentos. O crescimento das irregularidades no leito aumenta a resistência no fluxo. Com a modificação das propriedades hidráulicas do escoamento alteram-se também as dimensões das formas do leito e, conseqüentemente, a resistência ao fluxo (Srinivasan, 1992). Outro fenômeno que se observa é que em cada forma do leito podem existir alterações de seus formatos, como relatado por Simons & Sentürk (1992), na formação de *ripples* com o formato de pétalas de rosas.

Sendo a resistência ao fluxo em canais aluviais expressa através de um fator de resistência como o C de Chézy, o f de Darcy-Weisbach ou do n de Manning, as variações destes coeficientes nas diversas fases de transporte seriam enormes quando associados a cada forma do leito.

A Figura 2.7 indica os resultados obtidos por Vanoni & Brooks (1957) para a variação do fator de atrito f associada a cada forma do leito com dados de laboratório tendo sido mantida constante a profundidade do fluxo (Raudikivi, 1976).

A Figura 2.8 mostra a variação de um fator de atrito f obtida para o rio Grande no Novo México, Estados Unidos, em duas seções de medição (Alan & Kenedy, 1969).

Em ambos os casos, observam-se a variação do fator de atrito de até 10 vezes do seu valor mínimo. Para um canal rígido, com a mesma faixa de variação da vazão, a variação do valor de f seria desprezível (Srinivasan 1992). Descobrir um valor do fator de atrito f e em que condições hidráulicas e de transporte específicas ele acontece é um grande desafio.

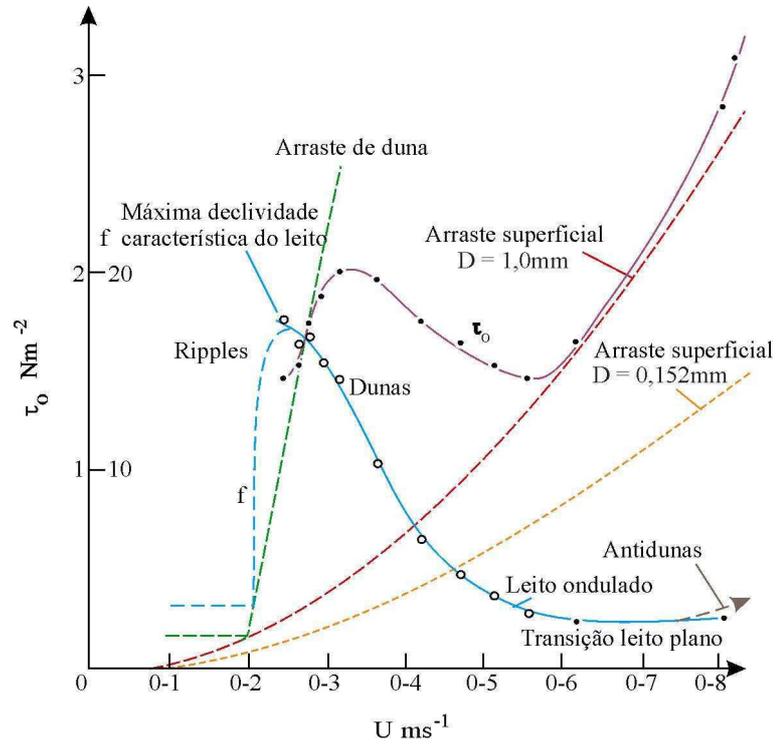


Figura 2.7 – Variação da tensão de cisalhamento com a velocidade do fluxo – Ensaio de Vanoni & Brooks (Raudikivi, 1976).

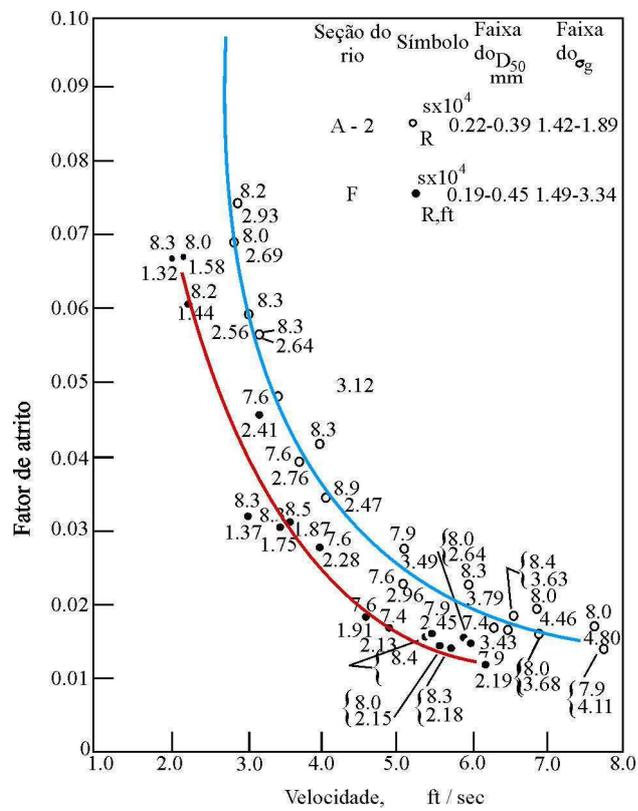


Figura 2.8 – Variação do fator de atrito com a velocidade do fluxo para dois trechos do rio Grande – (Alan & Kennedy, 1969).

2.8.1 – A repartição da resistência ao fluxo

Todas as pesquisas relacionadas à resistência dos canais aluviais atribuem grande variação do fator de atrito, seja na forma do C de Chézy, n de Manning ou f de Darcy-Weisbach, ao surgimento, mudança e desaparecimento das formas do leito.

Através dos princípios da Mecânica dos Fluidos, os obstáculos impõem ao fluxo, além de uma resistência superficial pelo desenvolvimento de uma camada limite, uma queda adicional da energia na forma de diminuição da pressão numa esteira formada pela separação da camada limite na face jusante. Assim, a força de resistência total é composta por uma força de cisalhamento na superfície e da força devido à diferença de pressão a jusante do obstáculo. Os dois componentes são conhecidos, como a força trativa da superfície e a força trativa da forma. A força trativa total por unidade de área do fluxo seria a tensão de cisalhamento total composta da tensão de cisalhamento relativa à superfície e a tensão de cisalhamento em relação a forma do obstáculo (Srinivasan, 1992).

Einstein (1950), no processo de repartição da tensão de cisalhamento total, admite que esta repartição seria equivalente a repartição do raio hidráulico R em duas partes R' e R'' , isto é:

$$R = R' + R'' \quad (2.8)$$

onde R' é o raio hidráulico necessário para superar a resistência dos grãos dos sedimentos da superfície e R'' é o raio hidráulico necessário para superar a resistência das formas do leito. Einstein & Barbarossa (1952) apresentaram duas relações para resolver o problema da determinação de cada parcela da resistência total ao fluxo com fronteiras móveis na presença das formas do leito. A primeira relação é baseada na equação logarítmica da distribuição de velocidade proposta por Keulegan (1938) e a segunda relação funcional proposta por Einstein & Barbarossa (1952) relaciona o arrasto de forma ao transporte de sedimentos com Ψ_{35} que é a intensidade de cisalhamento sobre as partículas cujo tamanho é igual a D_{35} (tamanho para o qual 35% do material do leito é mais fino). A relação funcional obtida por Einstein & Barbarossa (1952) foi estabelecida graficamente a partir de dados de campo é mostrada na Figura 2.9.

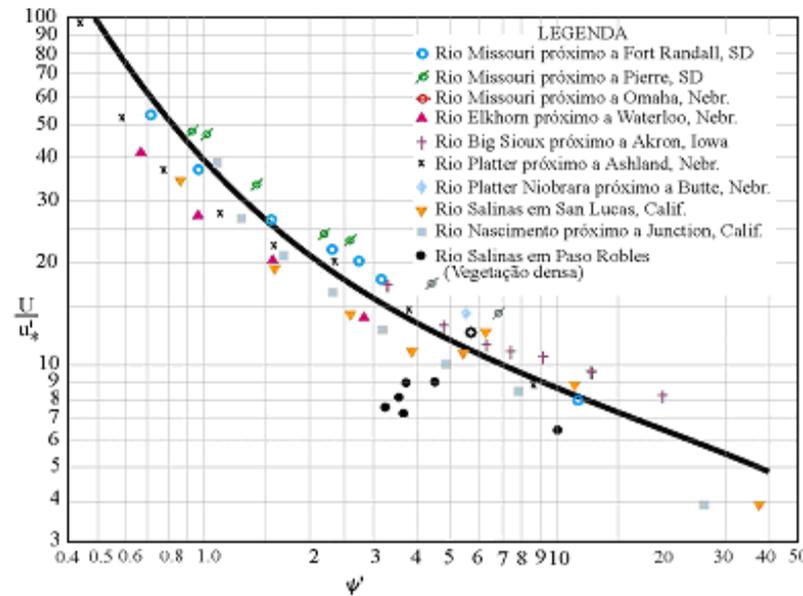


Figura 2.9 – Relação de Einstein & Barbarossa (1952) para a resistência ao fluxo devido às formas do leito [Simons & Richardson (1992)].

No gráfico de Einstein & Barbarossa (1952) todas as formas do leito estão agrupadas consistindo em uma limitação do seu método. Existe também uma grande dispersão dos pontos em torno da curva sugerida que implica em resultados menos precisos. Garde & Rangaraju (1966) encontraram uma grande dispersão entre os dados observados e os resultados obtidos com o método proposto por Einstein [Raudikivi (1976)]. As Figuras 2.10 e 2.11 mostram as relações gráficas obtidas por Garde & Rangaraju (1966) com dados de campo e de canais de laboratório plotados sobre a curva proposta por Einstein & Barbarossa (1952).

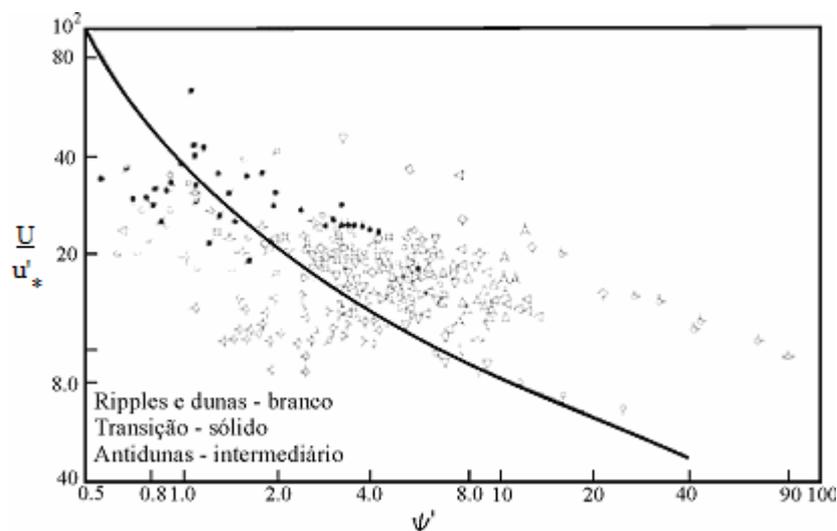


Figura 2.10 – Dados de campo plotados na curva de Einstein & Barbarossa (Garde & Rangaraju, 1966).

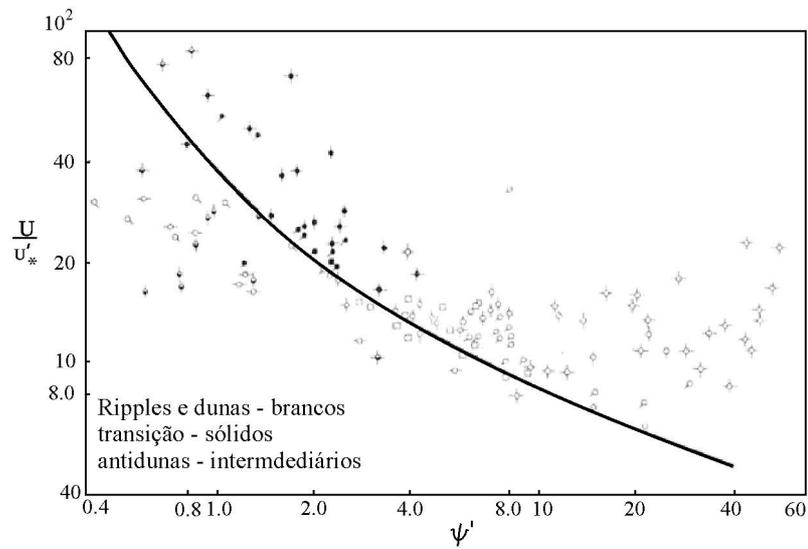


Figura 2.11 – Dados de laboratório plotados na curva de Einstein & Barbarossa (Garde & Rangaraju, 1966).

Veiga da Cunha (Vanoni, 1975), analisando dados de um rio em Portugal com material do leito grosso, concluiu que existe uma ramificação na curva proposta por Einstein & Barbarossa (1952), para altos valores do parâmetro ψ' . A Figura 2.12 indica esta ramificação em pontilhado.

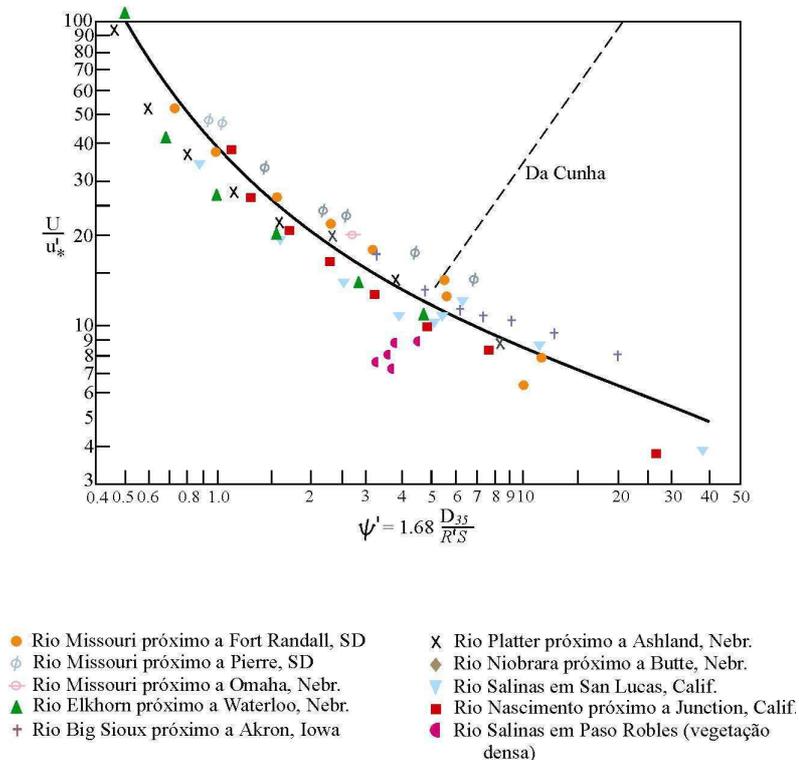


Figura 2.12 – Intensidade de cisalhamento devido as irregularidades do canal como uma função do transporte de sedimentos (após Einstein & Barbarossa, 1952).

Shen (1962) se propôs a melhorar o método de Einstein e Barbarossa, tentando que o mesmo fosse compatível com os dados de laboratório. Apesar de esclarecer uma ramificação na curva de Einstein e Barbarossa, a contribuição de Shen (1962) não parece ter dado avanços significativos. Grandes erros são observados com dados de campo, bem como uma grande dispersão entre os valores médios obtidos. Garde & Rangaraju (1966) também consideraram o método proposto por Shen (1962) insatisfatório quando aplicado para um conjunto de dados de laboratório.

A utilização do método proposto por Vanoni para o cálculo de R' e R'' resulta em menores erros do que o método de Einstein, sendo considerado como um aperfeiçoamento deste método.

Engelund (1966) e Smith & McLean (1977) introduziram uma alternativa baseada para a repartição da resistência considerando a soma de duas parcelas referentes às declividades das linhas de energia, como:

$$S = S' + S'' \quad (2.13)$$

onde, S' é declividade da linha de energia devido à resistência dos grãos da mistura e S'' é a declividade da linha de energia capaz de superar a resistência das formas do leito.

Chien & Wan (1999) comentam que a equação (2.8), de repartição do raio hidráulico, serve apenas como referência mas não pode ser utilizada universalmente, devido a resistência dos grãos afetar a resistência relativa à forma e vice-versa.

Outras pesquisas, como as realizadas por Karim (1995), Wu & Wang (1999), Yu & Lim (2003), mostraram uma melhor estimativa para a tensão de cisalhamento no leito por ajuste do coeficiente de Manning através de análise dimensional utilizando as técnicas de regressão.

Engelund & Hansen (1967) tentaram solucionar o problema da avaliação da resistência das formas do leito pelos mesmos conceitos de repartição da tensão de cisalhamento mas por métodos diferentes. Engelund & Hansen (1967) utilizaram a hipótese da semelhança para verificar a natureza da variação dos componentes da tensão de cisalhamento total, entre dois escoamentos diferentes mas com a mesma forma do leito.

Van Rijn (1984c) tentou definir a resistência dos grãos dos sedimentos e das formas do leito através de uma altura de resistência para cada componente. Cada uma das alturas é expressa como a altura da rugosidade equivalente dos grãos de areia. Para grãos de areia, a altura da rugosidade é considerada $3D_{90}$. Os dois últimos métodos citados não consideraram a formação de *ripples* como forma do leito.

Yang *et al.* (2005) analisaram a resistência ao fluxo e a geometria da forma do leito em um canal largo considerando a repartição da resistência relativa ao grão e à forma do leito, propondo uma equação para representar a tensão de cisalhamento total sobre o leito como uma função da rugosidade dos grãos e da forma do leito. Yang *et al.* (2005) concluíram através da base de dados utilizados que a rugosidade do grão era igual a duas vezes o tamanho mediano dos sedimentos do leito. A influência do comprimento e altura das formas do leito sobre a tensão de cisalhamento total e a declividade da linha de energia foi analisada e expressões empíricas para o comprimento da zona de separação entre as formas do leito também foram propostas.

Poucos trabalhos analisam a resistência em canais aluviais em função da distribuição granulométrica das misturas. Siqueira (1997) investigou a influência da distribuição granulométrica sobre o transporte sólido em canais erodíveis. Srinivasan *et al.* (2005, 2006) propuseram uma relação funcional entre uma forma diferente do parâmetro de resistência B e o parâmetro adimensional $u_* / (g\nu)^{1/3}$ em que avaliaram a influência da distribuição granulométrica de uma mistura de sedimentos sobre a resistência dos canais aluviais. A função proposta foi definida para cada forma do leito e cada mistura.

Como se pode observar a definição de uma função de resistência é extremamente complicada. O próprio processo de repartição da resistência sugerido por Einstein (1950) não é bem definido, tendo recebido ao longo do tempo pequenas modificações, resultando em grandes erros como visto nos resultados obtidos por Garde & Rangaraju (1966), Veiga da Cunha [Vanoni (1975)], Shen (1962), entre outros. Portanto, não existe ainda consenso entre os pesquisadores na utilização da repartição da resistência total.

Isto leva a crer que qualquer método utilizado para a previsão da resistência ao fluxo deve reconhecer a distinção entre as diversas formas do leito para que os resultados sejam específicos para cada condição do fluxo. Existe uma seqüência de desenvolvimento das formas do leito com o aumento da vazão, mantendo a profundidade constante, e esta seqüência se inverte com a diminuição da vazão. Assim parece lógico, considerar, cada faixa de permanência de uma forma do leito como um regime de resistência distinto.

Para evitar a utilização da repartição da resistência, devido às incertezas inerentes ao processo e aos erros observados nas tentativas de avaliação da resistência devido aos grãos presentes na superfície e às formas do leito, propõe-se neste trabalho uma metodologia para determinação de uma função de resistência total para canais aluviais e rios associada a cada forma do leito, bem como investigar, durante o processo de determinação da função de

resistência total, a influência da distribuição granulométrica de uma mistura de sedimentos através do leito plano como forma do leito e das misturas bimodais.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Considerações iniciais

No presente estudo, são considerados apenas os efeitos das formas do leito que ocorrem em canais de laboratório ou em um trecho retilíneo de um rio quando observado o escoamento em condições de regime praticamente permanente e uniforme. No entanto, existem diferenças fundamentais entre estes dois tipos de canais aluviais. Diferentemente dos rios, no canal de laboratório, as paredes laterais em sua grande maioria são de vidro e não são erodidas pela ação do fluxo, as rugosidades do fundo e das paredes laterais são diferentes em termos da rugosidade da superfície.

Um bom método para a previsão da resistência dos canais aluviais deve ser aplicável tanto para canais naturais quanto para os canais de laboratório. Mesmo entre os métodos considerados como melhores para a previsão da resistência, como os de Eintein & Barbarossa (1952), Shen (1962), Engelund & Hansen (1967), que utilizam a repartição da resistência relativa às formas do leito e da superfície, as diferenças são significativas e em geral aqueles que funcionam bem em rios não funcionam bem em canais de laboratório e vice-versa (Simons & Senturk, 1976; Vanoni, 1984 e Van Rijn, 1984b, 1984c).

A grande variação da resistência nos canais aluviais é causada pelas mudanças nas formas do leito e cada forma do leito representa um regime de resistência distinto. Apresenta-se neste capítulo, a partir da equação fundamental da resistência da superfície, uma relação funcional cuja variação pode ser associada aos efeitos da forma do leito e à distribuição granulométrica de sedimentos.

3.2 – Funções de resistência

A resistência dos canais aluviais é altamente variável devido à ocorrência das formas do leito. As formas do leito atuam como obstruções no leito provocando perda de energia nas esteiras formadas após a cada obstrução. Assim, os tamanhos dos elementos das formas do

leito determinam o grau de resistência oferecido ao fluxo. A altura média dos elementos da resistência é um parâmetro importante na definição da distribuição da velocidade no canal. Esta relação pode ser avaliada através da distribuição logarítmica da velocidade (Srinivasan & Hill, 1985).

Segundo Chow (1959), Keulegan utilizou a equação da distribuição logarítmica da velocidade determinada por Prandtl-Von Karman e derivou uma equação que representa a velocidade média em fluxos turbulentos para canais lisos e rugosos que com algumas simplificações podem ser representadas nas formas:

para canais lisos

$$V = u_* \left(3,25 + \frac{1}{k} \ln \frac{Ru_*}{\nu} \right) \quad (3.1)$$

e para canais rugosos,

$$V = u_* \left(6,25 + \frac{1}{k} \ln \frac{R}{k_s} \right) \quad (3.2)$$

onde V é a velocidade média, u_* é a velocidade de cisalhamento, R é o raio hidráulico, ν é a viscosidade cinemática, k é a constante universal de Von-Karman e k_s é a altura da rugosidade equivalente.

Estudos experimentais de Keulegan com dados de Nikuradse indicam um valor assumido por simplificação como constante na equação (3.1), sendo igual a 3,25. O valor 6,25 na equação (3.2) indica o valor médio entre 3,23 e 16,92 e foram obtidos por Keulegan usando dados de Bazin para canais rugosos.

Através da expressão de Chézy $V = C\sqrt{RS}$ e da definição da velocidade de cisalhamento $u_* = \sqrt{gRS}$ pode ser mostrado que:

$$\frac{V}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (3.3)$$

Após as investigações de Keulegan sobre fluxos turbulentos em canais com superfície livre, diversos outros pesquisadores realizaram experimentos para a determinação do coeficiente C de Chézy.

Segundo Chow (1959), um estudo experimental para a avaliação da resistência em fluxos turbulentos foi realizado por Iwagaki (1954) usando dados de vários pesquisadores. Os resultados obtidos por Iwagaki (1954) revelam que a resistência no fluxo turbulento é maior

em canais com superfície livre do que em tubos fechados com o aumento do número de Froude. Isto acontece devido ao aumento da instabilidade da superfície livre pelo aumento do número de Froude. Conseqüentemente, foi possível introduzir os efeitos da instabilidade da superfície livre nas equações de Keulegan considerando que os valores assumidos como constantes das equações (3.1) e (3.2) são funções do número de Froude. As equações (3.1) e (3.2) podem ser expressas nas formas seguintes:

para canais lisos

$$V = u_* \left(A_s + \frac{1}{k} \ln \frac{Ru_*}{\nu} \right) \quad (3.4)$$

e para canais rugosos,

$$V = u_* \left(A_r + \frac{1}{k} \ln \frac{R}{k_s} \right) \quad (3.5)$$

Nas equações (3.4) e (3.5), A_s e A_r são funções do número de Froude, e os demais termos das equações já foram definidos anteriormente. Estas constantes podem também incluir os efeitos de outros fatores menores. A Figura 3.1 mostra as relações de A_s e A_r com o número de Froude.

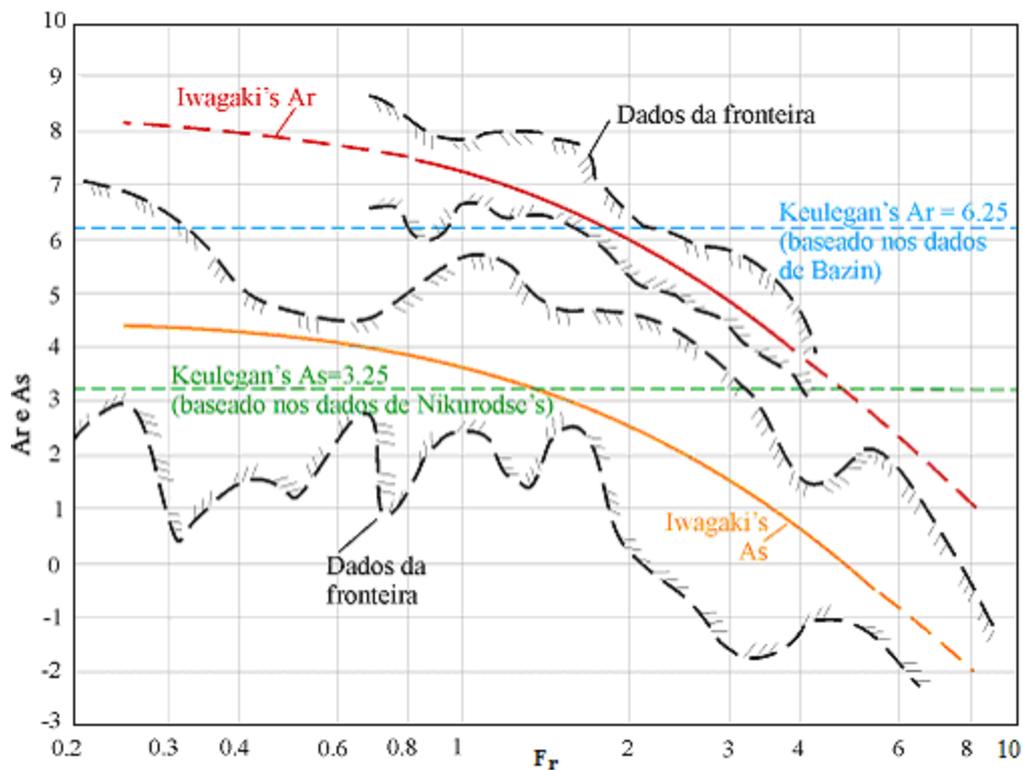


Figura 3.1 – Relações entre A_s , A_r e F_r (Chow, 1959).

Então, a equação de Keulegan para a velocidade média do fluxo obtida para canais rígidos também pode ser utilizada no caso de leitos aluviais. Assim, considerando um canal largo, temos:

$$\frac{V}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{R}{k_s}\right) + A_r \quad (3.6)$$

onde k é a constante universal de Von Karman, h é a profundidade de fluxo, k_s é a altura média dos elementos da rugosidade do leito igual ao diâmetro de grãos de areia e A_r é uma constante que depende da forma geométrica dos elementos da rugosidade (grãos de sedimentos e as formas do leito). A equação (3.6) pode ser escrita como:

$$\frac{V}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{R}{D_{50}}\right) + \frac{1}{k} \ln\left(\frac{D_{50}}{k_s}\right) + A_r \quad (3.7)$$

Os dois últimos termos do segundo membro representariam a influência das formas do leito e da superfície dos grãos de areia. A equação (3.7) representa, também, uma expressão para o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach referente ao leito f_b . Segundo Yang *et al.* (2005), a rugosidade relativa ao grão é dada por $2D_{50}$ e a rugosidade relativa à forma do leito depende da altura e declividade da forma do mesmo.

Em relação ao fator de atrito de Darcy-Weisbach referente ao leito, a equação (3.7) pode ser escrita para um canal largo cujo raio hidráulico do leito seria igual a profundidade do fluxo, na forma:

$$\sqrt{\frac{8}{f_b}} = \left(\frac{1}{k}\right) \ln\left(\frac{R_b}{D_{50}}\right) + A_2 \quad (3.8)$$

onde:

$$A_2 = A_r + \left(\frac{1}{k}\right) \ln\left(\frac{D_{50}}{k_s}\right) \quad (3.9)$$

ou

$$\sqrt{\frac{1}{f_b}} = \left(\frac{1}{\sqrt{8}}\right) \left(\frac{1}{k}\right) \ln\left(\frac{R_b}{D_{50}}\right) + B \quad (3.10)$$

onde:

$$B = \left(\frac{A_2}{\sqrt{8}}\right) \quad (3.11)$$

O parâmetro de resistência B obtido com os dados experimentais será identificado como B_o e calculado pela equação (3.10). O valor de B depende, portanto, da forma do leito presente devido ao fato que a rugosidade equivalente k_s depende das formas do leito. A constante de Von Karman k seria afetada pela presença de sedimentos em suspensão e esta quantidade também depende da forma do leito. Então, o valor universal de 0,4 pode ser adotado para k e qualquer alteração em relação a este, pode ser considerado como incluído no valor do fator aditivo B. Como B inclui os efeitos da forma do leito, os fatores que afetam a forma do leito irão influenciar o fator B. Srinivasan & Hill (1985) mostraram que os efeitos da profundidade, da viscosidade e da declividade são levados em conta pelo parâmetro adimensional $u_*/(gv)^{1/3}$.

A complexidade do fenômeno e o grande número de variáveis envolvidas no processo de erosão, transporte e deposição de sedimentos têm dificultado muito a compreensão completa da resistência dos canais aluviais. Grande parte das pesquisas relacionadas à resistência dos canais com leito móvel associa cada forma do leito a uma faixa de variação de alguns parâmetros escolhidos.

Uma relação funcional entre as variáveis do fluxo, dos sedimentos utilizados nos experimentos com misturas unimodais e bimodais e um parâmetro de resistência B associado a cada forma do leito pode ser proposta na forma geral como:

$$B = F \left[\frac{D_{50}}{k_s} \right] \quad (3.12)$$

Sendo assim, uma relação funcional entre a altura média dos elementos da rugosidade do leito igual ao diâmetro dos grãos de areia e as variáveis do fluxo e sedimento pode ser estabelecida pela relação abaixo, em que todas as variáveis já foram definidas anteriormente.

$$k_s = F[g, \rho_s, \rho, \mu, u_*, d, V, D_{50}] \quad (3.13)$$

ou ainda:

$$F[k_s, g, \rho_s, \rho, \mu, u_*, d, V, D_{50}] = 0 \quad (3.14)$$

Como o número de variáveis desta equação é elevado, uma tentativa de se determinar esta função experimentalmente se torna extremamente complexa. A análise dimensional com o teorema dos π ou de Buckingham foi utilizada para expressar uma relação funcional da equação (3.14) em termos de seis parâmetros adimensionais na forma:

$$F \left[\frac{u_*}{(gv)^{1/3}}, \frac{V}{\sqrt{gd}}, \frac{V}{(gv)^{1/3}}, \frac{g^{1/3} D_{50}}{v^{2/3}}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{D_{50}}{k_s} \right] = 0 \quad (3.15)$$

A relação funcional do parâmetro B, pode então, ser representada por:

$$B = F \left[\frac{D_{50}}{k_s} \right] = F_1 \left[\frac{u_*}{(gv)^{1/3}}, \frac{V}{\sqrt{gd}}, \frac{V}{(gv)^{1/3}}, \frac{g^{1/3} D_{50}}{v^{2/3}}, \frac{\rho_s}{\rho} \right] \quad (3.16)$$

O parâmetro $g^{1/3} D_{50} / v^{2/3}$, praticamente não varia para uma dada mistura se a temperatura da água não variar muito entre os ensaios. No presente estudo, o D_{50} das misturas foi considerado e para a maioria dos ensaios de laboratório é o mesmo para uma dada mistura associada a cada forma do leito. No caso de dados obtidos em grandes rios, o diâmetro mediano D_{50} variou para cada campanha de medição. A maioria dos ensaios foi realizada com pouca variação da temperatura e sendo os sedimentos da mesma origem e compostos em sua grande parte por sílica com massa específica constante ($\rho_s = 2,65 \text{ kg/m}^3$), o parâmetro ρ_s/ρ se torna constante em todos os ensaios. Desta forma a relação funcional fica reduzida para:

$$B = F_2 \left[\frac{u_*}{(gv)^{1/3}}, F_r, \frac{V}{(gv)^{1/3}} \right] \quad (3.17)$$

Srinivasan *et al.* (2005) propuseram uma relação funcional entre uma forma diferente do parâmetro de resistência B e o parâmetro adimensional $u_*/(gv)^{1/3}$ em que avaliaram a influência da distribuição granulométrica de uma mistura de sedimentos sobre a resistência dos canais aluviais. A função proposta foi definida para cada forma do leito e cada mistura.

O procedimento para se obter a relação para B foi o seguinte: com os valores de f_b e R_b , o valor de B foi calculado pela equação (3.10). Conhecendo-se a viscosidade cinemática pela temperatura de água, o valor de R_b , a velocidade média do fluxo, a velocidade de cisalhamento no leito e a declividade, os parâmetros adimensionais da equação (3.15) foram calculados.

Utilizando a análise dimensional com auxílio da técnica de regressão múltipla, foi estabelecida a relação funcional proposta na equação (3.17).

Entretanto, tentou-se obter uma forma mais simples desta relação funcional sem diminuir consideravelmente a precisão dos resultados. A análise de regressão múltipla mostrou que o parâmetro $V/(gv)^{1/3}$ era o menos influente entre os três parâmetros e desta forma definiu-se também a relação funcional da resistência simplificada como:

$$B = F \left[\frac{u_*}{(gv)^{1/3}}, F_r \right] \quad (3.18)$$

Esta relação foi considerada na avaliação da resistência para cada uma das misturas ensaiadas.

A primeira técnica de regressão múltipla testada foi a linear e como os resultados foram excelentes com a utilização desta técnica não havia mais a necessidade de se testar uma outra técnica de regressão.

Um suplemento do Microsoft Excel chamado “Metrixus”, desenvolvido pela empresa Elin Dúxus e disponibilizado pela Internet para utilização de forma experimental durante 90 dias, foi utilizado para a determinação das relações funcionais, porém este programa possui como limitação para a realização da análise dos dados que o número de linhas m seja maior que o número de colunas n de uma matriz ($m \times n$) para a amostragem. Para este trabalho, isto representa que a quantidade de ensaios deveria ser maior que a quantidade de parâmetros adimensionais utilizados como variáveis independentes. O parâmetro de resistência B foi a variável dependente em todos os casos. Em algumas séries de dados, o número de experimentos relacionados sempre a cada forma do leito não superou o número de variáveis independentes, condição necessária para que a técnica de regressão linear múltipla fosse usada. Além da relação funcional obtida entre as variáveis, o “Metrixus” também indica:

- a) o número de variáveis e da amostra utilizada;
- b) o valor médio de cada variável envolvida e o seu desvio padrão;
- c) os valores dos coeficientes de correlação R , de determinação R^2 e de determinação ajustado R^2A , da regressão linear múltipla;
- d) a estatística *Durbin-Watson* (DW) utilizada para verificação de auto-correlação entre as variáveis independentes;
- e) a ANOVA, uma Tabela contendo a análise de variância, as correlações simples entre as variáveis independentes e combinadas, contendo para cada variável os coeficientes de correlação a partir de grupos formados por combinações de outras variáveis independentes onde são apresentados os módulos dos valores das cinco maiores correlações absolutas $|R|$;
- f) bem como as combinações das demais variáveis que originaram estas correlações.

Foram analisados os dados obtidos por cada pesquisador de forma isolada levando-se em consideração inicialmente apenas as formas do leito e o tipo de canal. Para avaliar a

influência das formas do leito e da distribuição granulométrica das misturas sobre a resistência, os dados foram agrupados inicialmente levando-se em conta apenas cada forma do leito e tipo de canal. Para que a previsão da resistência dos canais aluviais seja eficaz, esta deve ser aplicável tanto para canais naturais quanto para os canais de laboratório. Como os dados destes dois tipos de canais foram utilizados, o agrupamento associado apenas a cada forma do leito foi realizado não considerando mais o tipo de canal.

Finalmente, para avaliar se existe a influência do diâmetro mediano sobre as relações funcionais obtidas, associadas também a cada forma do leito, o agrupamento por faixa de diâmetro mediano D_{50} também foi realizado. Para o agrupamento por faixa de diâmetro mediano, as regras de arredondamento foram utilizadas para a classificação das misturas unimodais.

Para as misturas bimodais, o agrupamento foi realizado considerando-se apenas as formas do leito, devido às três misturas utilizadas por Medeiros (1999) não possuírem a mesma ordem de grandeza relativa aos diâmetros medianos; portanto, o agrupamento por faixa de diâmetro mediano D_{50} não pôde ser realizado.

A partir da equação fundamental da resistência da superfície, é definida uma relação cuja variação pode ser associada aos efeitos da forma do leito e da distribuição granulométrica de sedimentos.

3.3 – Dados utilizados

Em todos os trabalhos selecionados que disponibilizaram os dados experimentais em canais aluviais, observou-se à ênfase da necessidade do estabelecimento das condições de equilíbrio do fluxo para que as medições fossem realizadas. Para que estas condições de estabilidade do fluxo sejam atingidas, alguns procedimentos experimentais são estabelecidos e realizados para que não exista a interferência da turbulência como acontece na entrada e saída do fluxo nos canais de laboratório que utilizam a recirculação da mistura de água e sedimentos, e no caso de grandes rios, o escoamento de base deve existir para se ter um escoamento praticamente permanente e uniforme, evitando a interferência da turbulência como a que pode ocorrer durante as grandes cheias. Em todos os canais de laboratório analisados, as medições foram realizadas na parte central dos mesmos minimizando a influência da turbulência nas seções de entrada e saída da mistura água-sedimento.

Os dados foram obtidos através de pesquisa em periódicos, revistas de cunho científico e ligadas ao tema, em dissertações de mestrado e uma tese de doutorado. Foram

também utilizados dados experimentais de laboratório e de campo coletados por diversos pesquisadores e órgãos governamentais.

Dados de Cavalcante (1992), Guy *et al.* (1966), Julien & Raslan (1998), Karim (1995, 1999), Medeiros (1999), Samaga *et al.* (1986), Srinivasan (1969) e Siqueira (1997) foram utilizados, totalizando 619 ensaios, onde 95 ensaios tinham *ripples* como forma do leito, 335 ensaios tinham dunas e 189 ensaios tinham leito plano. Todos os ensaios com *ripples* foram realizados em canais de laboratório utilizando misturas unimodais. Dos 335 ensaios com dunas, 226 foram obtidos usando misturas unimodais em canais de laboratório, 33 em grandes rios e 76 utilizando misturas bimodais em um canal de laboratório. Dos 189 ensaios com leito plano como forma do leito, 169 utilizaram misturas unimodais e 20 ensaios com misturas bimodais, onde todos foram realizados em canais de laboratório.

No presente trabalho, apenas os dados de Karim (1995, 1999) são referentes a canais naturais obtidos em grandes rios, onde para cada local de medição os parâmetros e variáveis do fluxo foram coletados. O diâmetro mediano D_{50} variou para cada campanha de medição, porém as dunas estavam presentes como forma do leito em todas as medições. A Figura 3.2 mostra as distribuições granulométricas das misturas utilizadas.

Como parte do programa de pesquisas do *U.S. Geological Survey*, a Divisão de Recursos Hídricos iniciou em setembro de 1956 um projeto para analisar os mecanismos do movimento da água e sedimentos em canais aluviais. Guy *et al.* (1966) publicaram um compêndio de dados hidráulicos e relativos ao transporte de sedimentos obtidos em dois canais de laboratório de recirculação em uma única série de experimentos realizados na *Colorado State University* entre 1956 e 1961. Foram realizados 339 experimentos nos dois canais, onde após a obtenção da condição de equilíbrio as medições eram efetuadas. As investigações para cada condição de fluxo iniciaram com leito plano sem movimento de sedimentos até atingir a condição de antidunas. Dos 339 experimentos, são apresentados 227 experimentos neste trabalho sendo, 36 ensaios com *ripples*, 67 ensaios com dunas, 31 experimentos com leito plano no canal de 2,44 m de largura, 14 ensaios com *ripples*, 62 ensaios com dunas e 17 experimentos com leito plano no canal de 0,61 m de largura. As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam as distribuições granulométricas das misturas utilizadas por Guy *et al.* (1966) em cada grupo de ensaios. Para as misturas com diâmetro mediano $D_{50} = 0,47$ mm e $D_{50} = 0,54$ mm, a bentonita foi adicionada ao fluxo para a obtenção da condição de estabilidade do fluxo devido ao seu efeito de sedimentação.

A Tabela 3.1 mostra a relação e algumas características dos dados selecionados de acordo com a fonte dos dados, o regime de resistência, a largura do canal b em metros, as misturas utilizadas por cada pesquisador, o diâmetro mediano de cada mistura D_{50} , o número de ensaios para cada conjunto de dados, e a variação do fator de atrito do leito f_b e do raio hidráulico do leito R_b através de seus valores mínimos e máximos. Na Tabela 3.1 inicialmente são apresentados os dados de canais de laboratório e por fim os dados obtidos por Karim (1995, 1999) em quatro grandes rios. As misturas 1, 2, 3 e 4, do conjunto de dados obtidos por Karim (1995, 1999), estavam presentes nos leitos dos rios Ganges, Middle Loup, Mississippi e Missouri, respectivamente.

A Tabela 3.2 indica a relação dos dados após o agrupamento das misturas por fonte de dados, regime de resistência, a largura do canal b em metros, tipo de mistura, diâmetro mediano D_{50} , número de ensaios e a variação do fator de atrito do leito f_b e raio hidráulico o leito R_b através dos seus valores máximos e mínimos. Nesta Tabela, também estão incluídos os dados agrupados por faixa de diâmetro mediano.

Tabela 3.1 – Relação dos dados utilizados

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura (s)	D_{50} (mm)	Número de ensaios	f_b		R_b (m)	
						mín	máx	mín	máx
Guy <i>et al.</i> (1966)	<i>Ripples</i>	2,44	1	0,19	11	0,0151	0,0357	0,0357	0,1659
			2	0,27	4	0,0152	0,0377	0,0627	0,1582
			3	0,28	7	0,0197	0,0346	0,0495	0,1748
			4	0,45	14	0,0169	0,0311	0,0227	0,0969
		0,61	5	0,32	3	0,0357	0,0481	0,0755	0,0932
			6	0,33	3	0,0080	0,0189	0,0376	0,0725
			7	0,47	6	0,0312	0,4030	0,1005	0,1366
			8	0,54	2	0,0103	0,0112	0,0471	0,0658
	0,61 e 2,44	Todas	-	50	0,0080	0,4030	0,0227	0,1748	
	<i>Dunas</i>	2,44	1	0,19	12	0,0242	0,0462	0,0859	0,2956
			2	0,27	9	0,0310	0,0702	0,0828	0,2954
			3	0,28	16	0,0248	0,0597	0,0670	0,2874
			4	0,45	11	0,0223	0,0882	0,0513	0,2868
		0,61	9	0,93	19	0,0182	0,1242	0,0850	0,3215
			5	0,32	13	0,0385	0,0940	0,0936	0,2518
6			0,33	7	0,0209	0,0565	0,0927	0,2086	
7			0,47	27	0,0152	0,3751	0,1043	0,5043	
0,61 e 2,44	Todas	-	129	0,0152	0,3751	0,0513	0,5043		
Leito plano	2,44	1	0,19	7	0,0029	0,0247	0,0195	0,2720	

Tabela 3.1 – continuação

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura (s)	D_{50} (mm)	Número de ensaios	f_b		R_b (m)	
						mín	máx	mín	Máx
Guy <i>et al.</i> (1966)	Leito plano	2,44	2	0,27	2	0,0050	0,0287	0,0528	0,2758
			3	0,28	6	0,0051	0,0325	0,0575	0,2776
			4	0,45	3	0,0072	0,0185	0,0190	0,1737
			9	0,93	13	0,0094	0,0186	0,0517	0,1447
		0,61	5	0,32	4	0,0015	0,0876	0,0101	0,3696
			6	0,33	3	0,0044	0,0573	0,0276	0,2506
			7	0,47	6	0,0491	0,0819	0,1119	0,3422
			8	0,54	4	0,0043	0,0827	0,0250	0,3727
		Todos	Todas	-	48	0,0015	0,0876	0,0101	0,1447
Srinivasan (1969)	Leito plano	0,60	1	0,09	52	0,0992	0,1634	0,0315	0,0411
Samaga <i>et al.</i> (1986)	Dunas	0,20	1	0,256	6	0,0655	0,0852	0,0680	0,1020
			2	0,42	9	0,0822	0,1043	0,0630	0,1050
			3	0,55	9	0,0522	0,0845	0,0570	0,0770
			4	0,58	9	0,0812	0,1106	0,0630	0,1170
			Todas	-	33	0,0522	0,1106	0,0570	0,1170
Cavalcante (1992)	<i>Ripples</i>	0,50	1	0,35	7	0,1282	0,186	0,0992	0,2130
	Dunas	0,50	1	0,35	12	0,0737	0,1724	0,0789	0,1933
			2	0,74	11	0,1179	0,5308	0,0802	0,1494
			Todas	-	23	0,0737	0,5308	0,0789	0,1933
	Leito plano	0,50	1	0,35	12	0,0537	0,1003	0,0595	0,1011
			2	0,74	4	0,1173	0,1985	0,0553	0,0697
Todas			-	16	0,0537	0,1985	0,0553	0,1011	

Tabela 3.1 – continuação

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura (s)	D_{50} (mm)	Número de Ensaio	f_b		R_b (m)	
						mín	máx	Mín	máx
Siqueira (1997)	<i>Ripples</i>	0,50	1	0,38	16	0,0910	0,2313	0,1056	0,1990
			2	0,38	8	0,1695	0,2129	0,1252	0,1849
			3	0,38	14	0,1385	0,3540	0,1286	0,1820
			Todas	-	38	0,0910	0,3540	0,1056	0,1990
	Dunas	0,50	1	0,38	14	0,0723	0,1989	0,1168	0,1881
			2	0,38	13	0,1214	0,2139	0,1401	0,1908
			3	0,38	14	0,0747	0,1545	0,1162	0,1725
			Todas	-	41	0,0723	0,2139	0,1162	0,1908
	Leito plano	0,50	1	0,38	9	0,0458	0,0707	0,0609	0,0892
			2	0,38	8	0,0551	0,0738	0,0750	0,0957
			3	0,38	8	0,0396	0,0601	0,0577	0,0867
			Todas	-	25	0,0396	0,0738	0,0577	0,0957
Julien & Raslan (1998)	Leito plano	1,30	1	0,20	11	0,0240	0,0430	0,0620	0,1230
			2	0,40	7	0,0280	0,0580	0,0550	0,0840
			3	0,60	10	0,0460	0,1030	0,0360	0,0540
¹ Medeiros (1999)	Dunas	0,50	1	0,62	24	0,0639	0,1366	0,1131	0,1518
			2	0,37	26	0,0743	0,1483	0,1234	0,1559
			3	1,60	26	0,0789	0,1185	0,1235	0,1439
			Todas	-	76	0,0639	0,1483	0,1131	0,1559
	Leito plano	0,50	2	0,37	10	0,0269	0,0440	0,0751	0,0894
			3	1,60	10	0,0265	0,0413	0,0727	0,0875
			2 e 3	-	20	0,0265	0,0440	0,0727	0,0894

¹ Dados obtidos utilizando misturas bimodais.

Tabela 3.1 – continuação

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura (s)	D_{50} (mm)	Número de Ensaio	f_b		R_b (m)	
						mín	máx	Mín	máx
² Karim (1995, 1999)	Dunas	-	1	-	7	0,0060	0,0070	11,270	13,520
		-	2	-	8	0,0749	0,0872	0,3170	0,3630
		-	3	-	8	0,0160	0,0197	14,440	16,400
		-	4	-	10	0,0130	0,0210	2,7830	3,1490
		-	Todas	-	33	0,0060	0,0872	0,3170	16,400

² Dados obtidos em grandes rios (Ganges, Middle Loup, Mississipi e Missouri).

Tabela 3.2 – Relação dos dados de misturas unimodais, agrupados conforme a forma do leito

Fonte dos dados	Regime	Número de ensaios	f_b		R_b (m)	
			mín	máx	Mín	máx
Guy <i>et al.</i> (1966), Cavalcante (1992) e Siqueira (1997)	<i>Ripples</i>	95	0,0080	0,4030	0,0227	0,2130
Guy <i>et al.</i> (1966), Samaga <i>et al.</i> (1986), Cavalcante (1992) e Siqueira (1997)	Dunas	226	0,0152	0,5308	0,0513	0,5043
³ Guy <i>et al.</i> (1966), Samaga <i>et al.</i> (1986), Cavalcante (1992), Karim (1995, 1999) e Siqueira (1997)	Dunas	259	0,0060	0,5308	0,0513	16,400
Guy <i>et al.</i> (1966), Srinivasan (1969), Cavalcante (1992), Siqueira (1997), Julien & Raslan (1998)	Leito plano	169	0,0015	0,1985	0,0101	0,1447
⁴ Guy <i>et al.</i> (1966), Srinivasan (1969), Cavalcante (1992), Siqueira (1997), Julien & Raslan (1998)	Leito plano	152	0,0029	0,1985	0,0190	0,2776
Samaga <i>et al.</i> (1986) - ($D_{50} \cong 0,60\text{mm}$)	Dunas	18	0,0522	0,1106	0,0570	0,1170
Guy <i>et al.</i> (1966) - ($D_{50} \cong 0,50\text{mm}$)	Dunas	53	0,0152	0,3751	0,0513	0,5043
Samaga <i>et al.</i> (1986), Cavalcante (1992) e Siqueira (1997) - ($D_{50} \cong 0,40\text{mm}$)	Dunas	62	0,0723	0,2139	0,0630	0,1908
Guy <i>et al.</i> (1966) e Samaga (1986) - ($D_{50} \cong 0,30\text{mm}$)	Dunas	51	0,0209	0,0940	0,0680	0,2954
Guy <i>et al.</i> (1966) - ($D_{50} \cong 0,50\text{mm}$)	Leito plano	13	0,0043	0,0827	0,0190	0,3727
Cavalcante (1992), Siqueira (1997) e Julien & Raslan (1998) - ($D_{50} \cong 0,40\text{mm}$)	Leito plano	35	0,0240	0,1003	0,0577	0,1230
Guy <i>et al.</i> (1966) - ($D_{50} \cong 0,30\text{mm}$)	Leito plano	15	0,0015	0,0876	0,0101	0,3696
Guy <i>et al.</i> (1966) e Julien & Raslan (1998) - ($D_{50} \cong 0,20\text{mm}$)	Leito plano	18	0,0029	0,0430	0,0620	0,2720

³ Dados de canais de laboratório e rios.⁴ Excluídos os dados obtidos por Guy *et al.* (1966) no canal de 0,61m de largura.

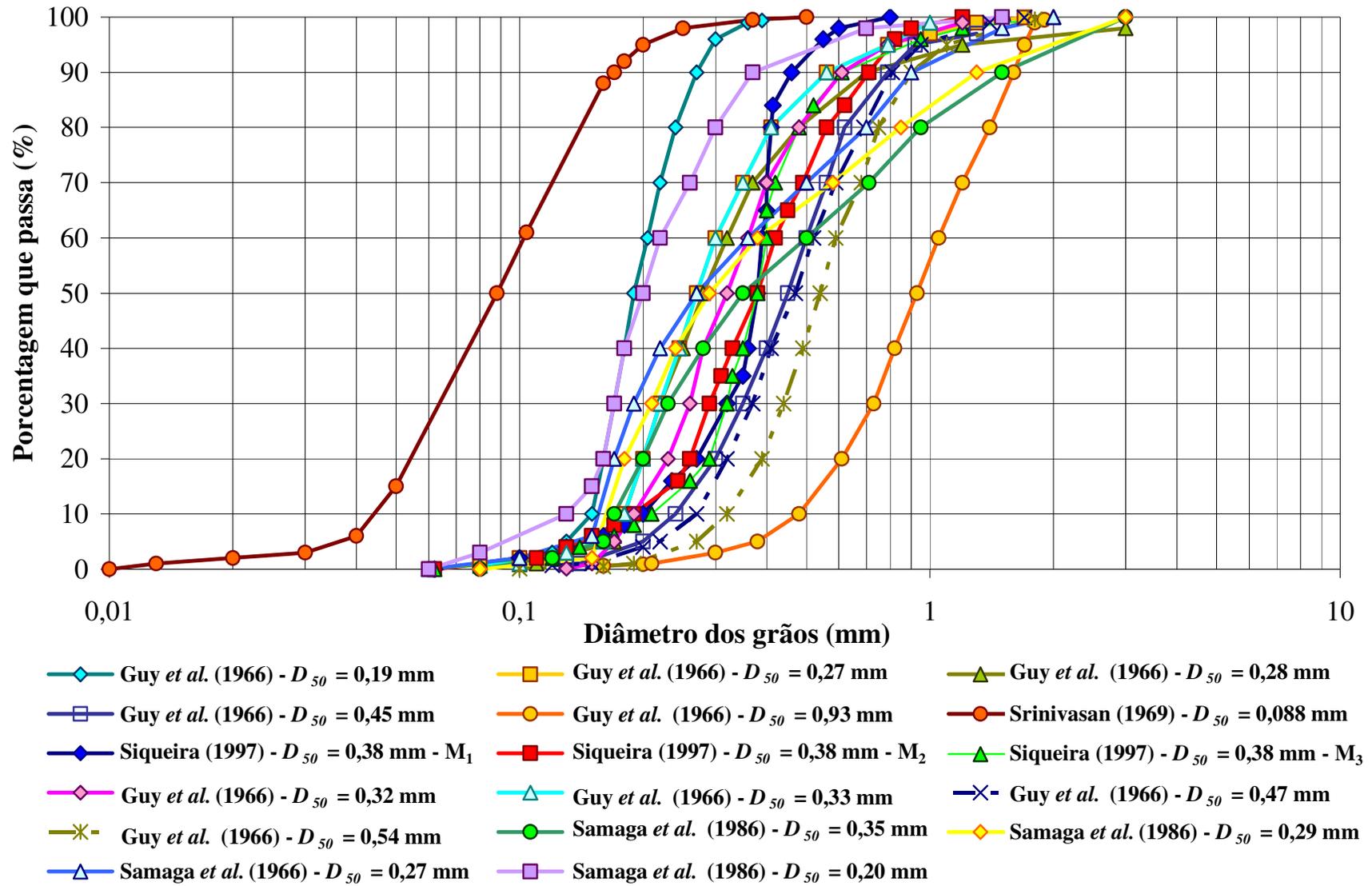


Figura 3.2 – Distribuições granulométricas disponíveis e utilizadas.

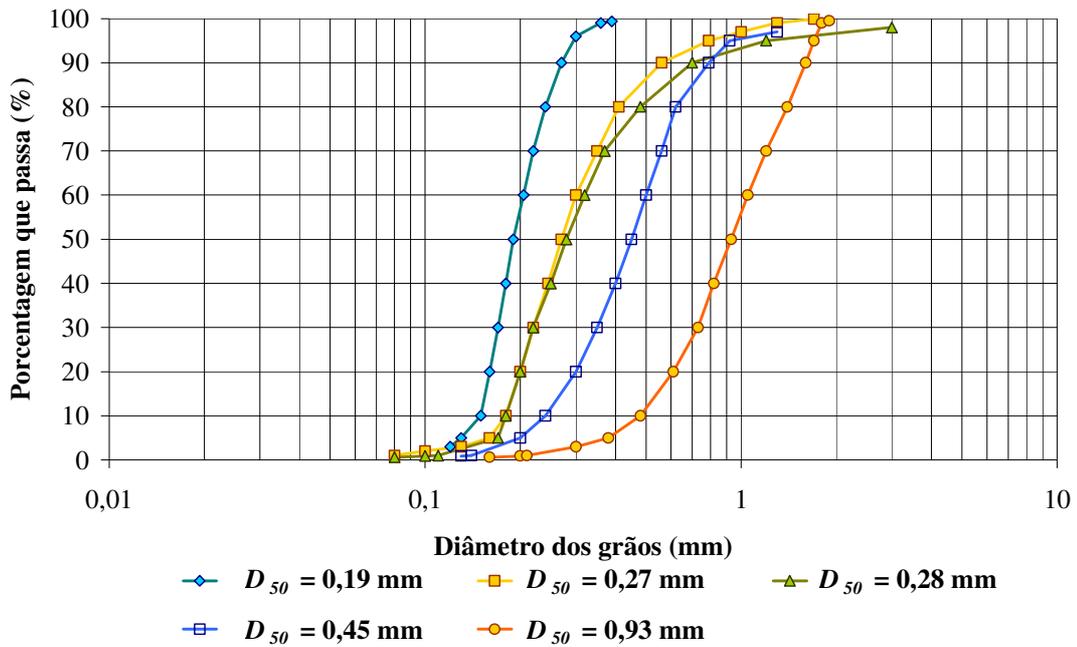


Figura 3.3 – Distribuições granulométricas das misturas utilizadas por Guy *et al.* (1966) no canal de 2,44 m de largura.

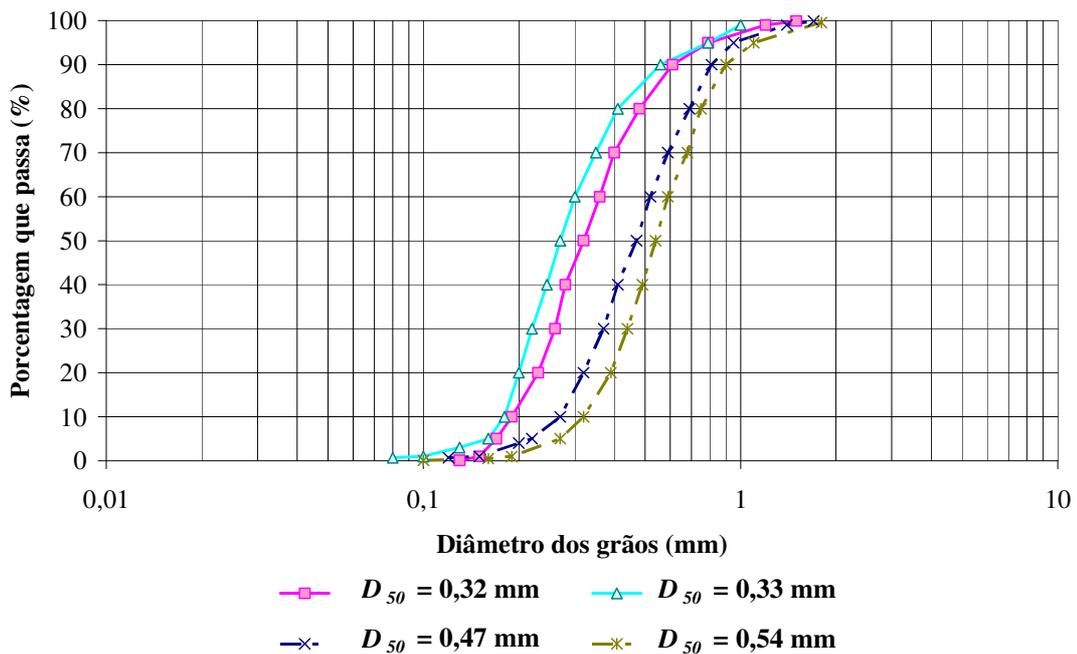


Figura 3.4 – Distribuições granulométricas das misturas utilizadas por Guy *et al.* (1966) no canal de 0,61 m de largura.

Srinivasan (1969) realizou uma série de ensaios em um canal de recirculação na Universidade de Waterloo no Canadá, obtendo uma relação funcional entre parâmetros adimensionais e definindo critérios para previsão da ocorrência das formas do leito. As

condições de equilíbrio foram sempre estabelecidas e as medições realizadas sempre com grande precisão devido ao sistema experimental utilizado. Três misturas de areia foram utilizadas com diâmetros medianos distintos ($D_{50} = 0,088$ mm, 0,150 mm e 0,310 mm) onde a variação da viscosidade da água foi obtida pelo aquecimento da água até $65,6^{\circ}\text{C}$ ($338,8\text{K}$).

Em cada ensaio e para cada mistura, a temperatura da água e a profundidade do fluxo foram pré-fixadas e o leito plano foi obtido com uma alta vazão onde posteriormente pequenos decréscimos na vazão foram introduzidos até tornar-se instável o leito composto por sedimentos, e assim desta forma *ripples* e dunas iam aparecendo. Os detalhes sobre o sistema experimental e coleta de dados são apresentados por Srinivasan (1969). A Figura 3.5 mostra a distribuição granulométrica de uma das três misturas utilizadas por Srinivasan (1969). A mistura indicada na Figura 3.5 foi selecionada para compor o conjunto de dados utilizados neste trabalho por apresentar todos os dados básicos utilizados na realização das análises cujo $D_{50} = 0,088\text{mm}$ sendo classificada como uma areia muito fina.

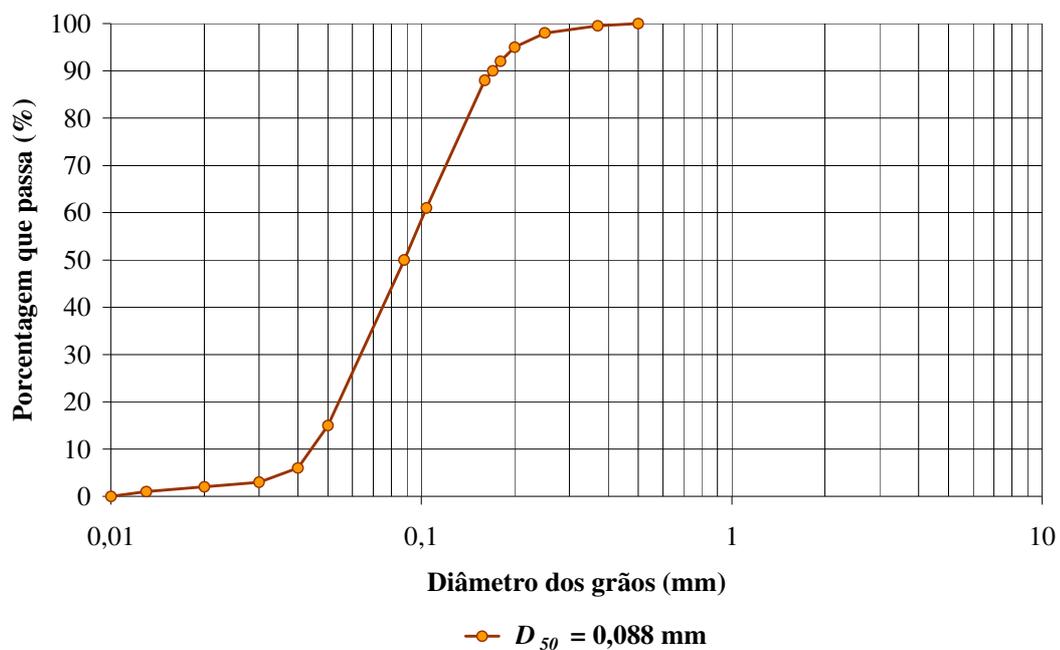


Figura 3.5 – Distribuição granulométrica da mistura utilizada de Srinivasan (1969).

Os trabalhos que utilizam apenas o leito plano como forma do leito e sistemas experimentais que permitam medições com grande precisão são raros. Sendo assim, os dados básicos obtidos por Srinivasan (1969) através de procedimentos rigorosos de medição nos 52 ensaios, com uma mistura unimodal composta por areia muito fina ($D_{50} = 0,088$ mm), realizados em um canal de recirculação de água e sedimentos da Universidade de Waterloo, Waterloo, Canadá, com 0,61 m de largura, são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dados básicos obtidos por Srinivasan (1969)

Ensaio	D_{50} (mm)	Q (m ³ /s)	d (m)	S (m/m)	V (m/s)	v (m ² /s)	F_r	f_b	R_b	u_{*b}
1A	0,088	0,123	0,249	0,001	0,808	8,4075E-07	0,518	0,021	0,162	0,041
1B	0,088	0,122	0,249	0,001	0,804	8,4075E-07	0,515	0,019	0,158	0,039
1C	0,088	0,120	0,249	0,001	0,790	8,4075E-07	0,506	0,016	0,150	0,036
1D	0,088	0,115	0,249	0,001	0,757	8,4075E-07	0,485	0,016	0,148	0,034
2A	0,088	0,123	0,242	0,001	0,835	8,4075E-07	0,542	0,016	0,145	0,037
2B	0,088	0,123	0,242	0,001	0,835	8,4075E-07	0,542	0,014	0,141	0,036
2C	0,088	0,119	0,242	0,001	0,809	8,4075E-07	0,525	0,015	0,143	0,035
2D	0,088	0,118	0,242	0,001	0,799	8,4075E-07	0,519	0,015	0,143	0,035
2E	0,088	0,117	0,242	0,001	0,792	8,4075E-07	0,514	0,014	0,139	0,033
2F	0,088	0,115	0,242	0,001	0,782	8,4075E-07	0,508	0,014	0,137	0,032
2G	0,088	0,114	0,242	0,001	0,770	8,4075E-07	0,500	0,013	0,136	0,032
3A	0,088	0,120	0,239	0,001	0,822	8,4075E-07	0,538	0,013	0,136	0,034
3B	0,088	0,116	0,239	0,001	0,794	8,4075E-07	0,519	0,014	0,138	0,033
3C	0,088	0,115	0,239	0,001	0,789	8,4075E-07	0,516	0,013	0,135	0,032
3D	0,088	0,113	0,239	0,001	0,774	8,4075E-07	0,506	0,013	0,136	0,032
4A	0,088	0,119	0,249	0,001	0,781	8,4075E-07	0,500	0,018	0,153	0,037
4B	0,088	0,115	0,249	0,001	0,759	8,4075E-07	0,486	0,016	0,149	0,034
4C	0,088	0,113	0,249	0,001	0,743	8,4075E-07	0,476	0,016	0,149	0,033
5A	0,088	0,119	0,256	0,001	0,760	8,4075E-07	0,480	0,020	0,163	0,038
5B	0,088	0,114	0,256	0,001	0,733	8,4075E-07	0,463	0,018	0,158	0,035
6A	0,088	0,108	0,195	0,001	0,909	8,4075E-07	0,657	0,014	0,123	0,038
6B	0,088	0,096	0,195	0,001	0,808	8,4075E-07	0,583	0,016	0,126	0,036
6C	0,088	0,090	0,195	0,001	0,759	8,4075E-07	0,549	0,015	0,123	0,033
7A	0,088	0,093	0,193	0,001	0,792	8,4075E-07	0,575	0,017	0,127	0,036
7B	0,088	0,093	0,193	0,001	0,787	8,4075E-07	0,572	0,017	0,127	0,036
7C	0,088	0,089	0,193	0,001	0,755	8,4075E-07	0,549	0,017	0,128	0,035
7D	0,088	0,090	0,193	0,001	0,764	8,4075E-07	0,555	0,016	0,126	0,035
7E	0,088	0,088	0,193	0,001	0,751	8,4075E-07	0,546	0,016	0,125	0,033
8A	0,088	0,107	0,204	0,001	0,861	8,4075E-07	0,609	0,017	0,133	0,039
8B	0,088	0,096	0,204	0,001	0,772	8,4075E-07	0,546	0,018	0,136	0,037
8C	0,088	0,093	0,204	0,001	0,750	8,4075E-07	0,530	0,019	0,137	0,037
8D	0,088	0,091	0,204	0,001	0,729	8,4075E-07	0,516	0,018	0,135	0,035
9A	0,088	0,099	0,198	0,001	0,818	8,4075E-07	0,587	0,015	0,126	0,035
9B	0,088	0,096	0,198	0,001	0,791	8,4075E-07	0,567	0,015	0,126	0,035
9C	0,088	0,094	0,198	0,001	0,773	8,4075E-07	0,554	0,016	0,128	0,035
9D	0,088	0,090	0,198	0,001	0,745	8,4075E-07	0,534	0,015	0,126	0,033
10A	0,088	0,098	0,207	0,001	0,779	8,4075E-07	0,547	0,018	0,137	0,037
10B	0,088	0,096	0,207	0,001	0,761	8,4075E-07	0,534	0,018	0,135	0,036
10C	0,088	0,093	0,207	0,001	0,736	8,4075E-07	0,517	0,016	0,131	0,033
11A	0,088	0,089	0,159	0,001	0,919	8,4075E-07	0,736	0,011	0,099	0,034
11B	0,088	0,083	0,159	0,001	0,858	8,4075E-07	0,688	0,012	0,100	0,033
11C	0,088	0,076	0,159	0,001	0,781	8,4075E-07	0,626	0,015	0,106	0,033
11D	0,088	0,071	0,159	0,001	0,738	8,4075E-07	0,591	0,016	0,108	0,033
12A	0,088	0,090	0,170	0,001	0,865	8,4075E-07	0,670	0,014	0,112	0,037
12B	0,088	0,087	0,170	0,001	0,843	8,4075E-07	0,653	0,014	0,111	0,036
12C	0,088	0,085	0,170	0,001	0,822	8,4075E-07	0,636	0,013	0,108	0,033
12D	0,088	0,081	0,170	0,001	0,780	8,4075E-07	0,604	0,013	0,108	0,032
13	0,088	0,078	0,163	0,001	0,781	8,4075E-07	0,618	0,015	0,109	0,034
14A	0,088	0,085	0,170	0,001	0,822	8,4075E-07	0,637	0,014	0,111	0,035
14B	0,088	0,080	0,170	0,001	0,773	8,4075E-07	0,599	0,015	0,111	0,033
15A	0,088	0,081	0,165	0,001	0,808	8,4075E-07	0,635	0,015	0,110	0,035
15B	0,088	0,076	0,165	0,001	0,760	8,4075E-07	0,597	0,015	0,110	0,033

Samaga *et al.* (1986) conduziram seus experimentos em um canal de laboratório com 0,20 m de largura utilizando quatro misturas com diâmetros medianos diferentes, onde as taxas de transporte da carga do leito e em suspensão foram medidas em 33 ensaios com dunas. Os dados básicos foram obtidos para o cálculo da taxa de transporte da carga do leito de frações individuais, o que possibilitou a obtenção do fator de atrito do leito, raio hidráulico do leito e o número de Froude.

As formas do leito para os ensaios não foram indicadas e os métodos propostos por Srinivasan (1969) e Karim (1999) para a identificação das formas do leito foram utilizados possibilitando a classificação das formas do leito para cada ensaio. Não houve diferença na classificação das formas do leito pelos métodos de Srinivasan (1969) e Karim (1999) para os ensaios disponibilizados por Samaga *et al.* (1986). A Figura 3.6 indica a distribuição granulométrica das misturas utilizadas por Samaga *et al.* (1986).

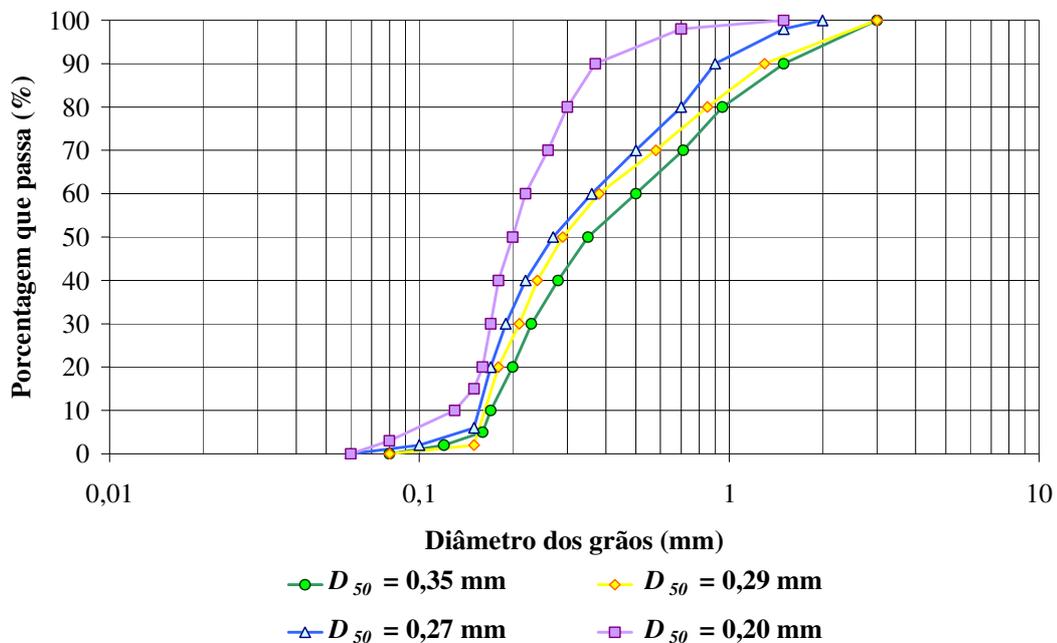


Figura 3.6 – Distribuições granulométricas das quatro misturas utilizadas por Samaga *et al.* (1986).

Cavalcante (1992) realizou uma série de ensaios em um canal de recirculação de água e sedimentos do laboratório de hidráulica da Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, para um estudo comparativo da confiabilidade das equações de transporte de sedimentos, utilizando duas misturas unimodais de sedimentos e totalizando 51 experimentos, onde 46 ensaios foram analisados neste trabalho devido à inconsistência verificada pelo autor em cinco ensaios de sua série. Dos 46 experimentos utilizados neste trabalho, 31 ensaios

foram obtidos com a primeira mistura ($D_{50} = 0,35$ mm) e 15 ensaios com a segunda mistura ($D_{50} = 0,74$ mm). Destes sete ensaios foram obtidos com *ripples*, doze ensaios com dunas e doze ensaios com leito plano para a primeira mistura e onze ensaios com dunas e quatro ensaios com leito plano como forma do leito para a segunda mistura.

Os dados referentes às distribuições granulométricas das misturas utilizadas por Cavalcante (1992) não se encontram disponíveis.

Karim (1995) propôs um novo método para a previsão da resistência em canais aluviais desenvolvendo uma relação funcional baseada na equação de Manning e trabalhou com dados de canais de laboratório e de rios. Os dados básicos de grandes rios que possuíam uma quantidade mínima de ensaios, em que a metodologia proposta neste trabalho pudesse ser utilizada, formam a amostra relativa a canais naturais. Para o rio Middle Loup, estavam disponíveis oito ensaios, oito ensaios para o rio Mississipi e sete ensaios para o rio Ganges. As formas do leito para cada conjunto de ensaios obtidos por Karim não estavam disponíveis e o método proposto por Srinivasan (1969) e Karim (1999) para identificação das formas do leito foram utilizados para a classificação das formas do leito para cada experimento. Através dos dois métodos de previsão das formas do leito todos os ensaios enquadraram-se na condição de dunas. Os dados de canais de laboratório usados por Karim (1995) foram coletados por Guy *et al.* (1966) e já compõem o conjunto de dados desse pesquisador.

Siqueira (1997), utilizando um canal de recirculação de água e sedimentos do Laboratório de Hidráulica da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, de 0,50 m de largura, realizou uma pesquisa sobre a influência da distribuição granulométrica sobre o transporte e a resistência em canais aluviais. Neste estudo, foram utilizados 104 dos 111 experimentos realizados por Siqueira com três misturas unimodais de mesmo diâmetro mediano ($D_{50} = 0,38$ mm), onde cada tipo de mistura formava três séries, correspondentes as três misturas utilizadas.

Segundo Siqueira (1997), foi possível obter *ripples* com todas as misturas. Os 104 ensaios com as três misturas unimodais foram assim distribuídos:

- primeira mistura: 16 experimentos com *ripples*, 14 com dunas e 9 com leito plano, totalizando 39 experimentos;
- segunda mistura: 8 experimentos com *ripples*, 13 com dunas e 8 com leito plano, totalizando 29 experimentos;
- terceira mistura: 14 experimentos com *ripples*, 14 com dunas e 8 com leito plano, totalizando 36 experimentos.

A Figura 3.7 mostra a distribuição granulométrica das três misturas unimodais utilizadas por Siqueira (1997).

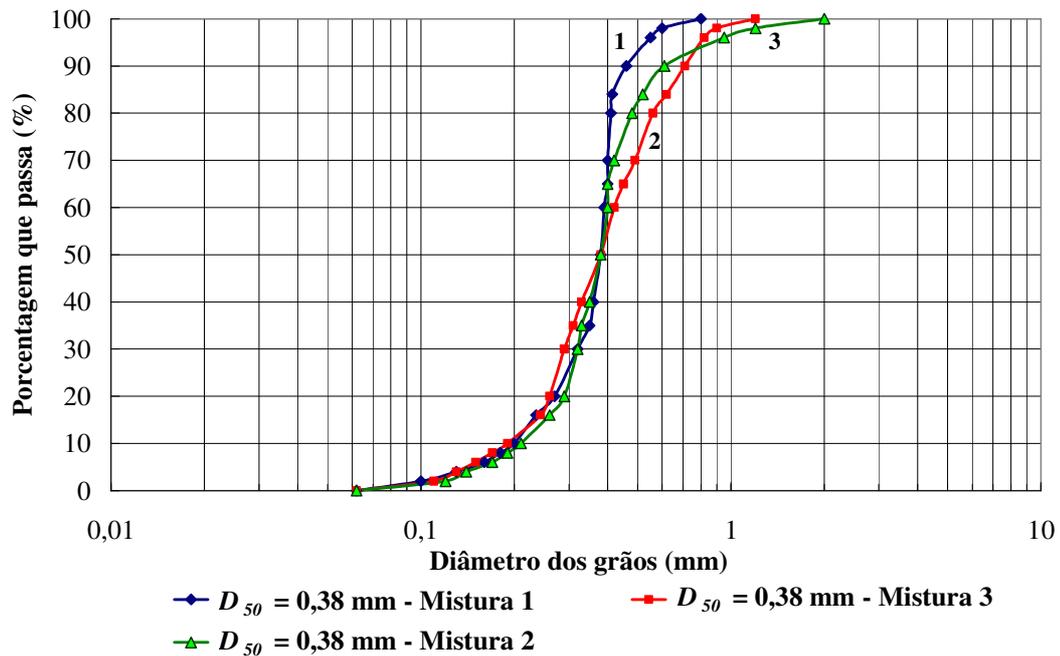


Figura 3.7 – Distribuições granulométricas das três misturas unimodais utilizadas por Siqueira (1997).

Julien & Raslan (1998), analisando dados de laboratório e de campo, definiram um regime superior de leito plano com transporte de sedimentos, disponibilizando 28 experimentos com três misturas distintas em um canal de recirculação de água e sedimentos com 1,30 m de largura. Segundo Julien & Raslan (1998), a ocorrência de um regime superior de leito plano relaciona-se com a espessura de uma subcamada limite laminar δ e é dependente da velocidade de cisalhamento u_* , do diâmetro mediano do grão D_{50} e do número de Reynolds de cisalhamento R_* . Não estão disponíveis os dados referentes à distribuição granulométrica das misturas utilizadas por Julien & Raslan (1998).

Karim (1999) propôs um método para a previsão da altura relativa da forma do leito em fluxos sobre leitos de areia, estando disponíveis 10 ensaios no rio Missouri. O método proposto, segundo Karim, pode ser usado para as várias formas do leito conhecidas como *ripples*, dunas, leito plano e antidunas. As distribuições granulométricas das misturas presentes em cada rio não foram fornecidas nos trabalhos de Karim (1995, 1999). Entretanto, o diâmetro mediano foi indicado para todas as medições realizadas.

Medeiros (1999) realizou uma investigação sobre o transporte de sedimentos de misturas bimodais. Três misturas bimodais com diferentes diâmetros medianos foram

utilizadas tendo sido realizados 96 ensaios, sendo 76 ensaios com dunas e 20 ensaios com leito plano em um canal de recirculação de água e sedimentos com 0,50 m de largura. A Figura 3.8 indica a distribuição granulométrica das misturas bimodais usadas por Medeiros (1999).

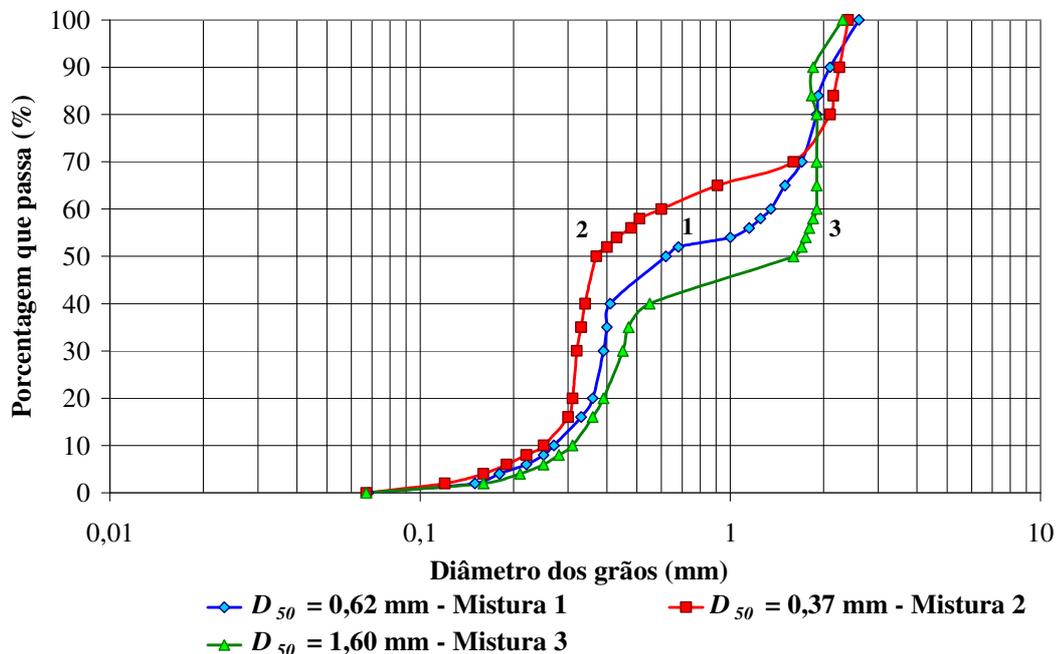


Figura 3.8 – Distribuição granulométrica das três misturas bimodais utilizadas por Medeiros (1999).

3.4 – Tratamento dos dados

Como já descrito anteriormente, a maioria dos dados brutos obtidos por diversos pesquisadores e órgãos governamentais foram provenientes de experimentos realizados em canais de laboratório de pequena largura com o leito recoberto por sedimentos arenosos, onde as rugosidades do leito e das paredes laterais são diferentes. Observou-se também que as paredes laterais dos canais são lisas e não podem ser erodidas pela ação do fluxo. Esta característica não é observada nos rios em que as margens podem ser erodidas ou possuem grande largura, o que minimiza os efeitos laterais. Sendo assim, os dados brutos obtidos em canais de laboratório necessitavam de correções devido aos efeitos das paredes laterais lisas onde o leito poderia apresentar um certo padrão de irregularidades, indicando que o raio hidráulico não era uniforme.

O raio hidráulico da seção em canais de laboratório foi corrigido para se obter um valor equivalente ao de um canal largo com o leito composto por uma mistura de sedimentos.

O método sugerido por Vanoni & Brooks (1957) para correção dos efeitos das paredes laterais lisas foi adotado para determinação dos valores do fator de atrito e raio hidráulico relativos ao leito, o que permitiu o cálculo dos parâmetros de resistência B_o e B_c . O método de Vanoni & Brooks (1957) encontra-se descrito no anexo A e maiores detalhes sobre o procedimento da correção dos efeitos das paredes laterais podem ser encontrados nos trabalhos de Rêgo (1981) e Srinivasan (1969).

Os dados obtidos por Julien & Raslan (1998) já haviam sido corrigidos pelo mesmo método de correção dos efeitos das paredes laterais sugerido por Vanoni & Brooks (1957) e por isso não necessitaram de correção.

Em algumas publicações como o compêndio de dados de Guy *et al.* (1966), Karim (1995, 1999), a tese de doutorado de Srinivasan (1969) e dissertações de mestrado de Siqueira (1997) e Medeiros (1999), os valores do fator de atrito e raio hidráulico referentes ao leito já estavam indicados, mesmo assim os valores foram conferidos e nos demais casos estes valores foram calculados. Os dados obtidos por Guy *et al.* (1966) e Srinivasan (1969) foram publicados originalmente no Sistema Inglês de unidades tendo sido aqui convertidos para o Sistema Internacional de unidades (SI).

Os detalhes dos sistemas experimentais encontram-se descritos nos trabalhos publicados por cada pesquisador. Alguns dados apresentaram dúvidas em relação aos resultados obtidos do parâmetro de resistência B, o que pode ter sido proveniente do processo de medição realizado nos ensaios, e do tipo de canal utilizado quando o procedimento de correção dos efeitos das paredes laterais não excluiu totalmente estes efeitos e foram eliminados. Os resultados são apresentados no capítulo seguinte.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Considerações iniciais

Em um canal aluvial, o surgimento das formas do leito é resultado de diversas interações entre o fluxo acima do leito e o leito composto por sedimentos. As características dos sedimentos, o tipo e a forma do canal, a intensidade do fluxo, além de outros fatores, modificam as condições de fronteira, que são continuamente alteradas pela ação do fluxo, tornando a física do surgimento das formas do leito bastante complicada.

A mobilidade do leito dos canais aluviais torna a resistência dependente de muitos fatores que se inter-relacionam incluindo a resistência devido ao grão e às formas do leito. Segundo Yang *et al.* (2005), a forma do leito é dependente da profundidade do fluxo e do tamanho do grão na superfície. Esta dependência também foi verificada através dos dados selecionados que foram apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2 e, os mesmos, constituem os dados básicos para a determinação dos parâmetros de resistência B.

4.2 – A Variação do parâmetro de resistência B

O parâmetro de resistência B, obtido através da relação funcional indicada pela análise dimensional utilizando a técnica de regressão linear múltipla com três ou dois parâmetros adimensionais pode ser definido, respectivamente, na forma:

$$B = A \left(\frac{u_{*b}}{(gv)^{1/3}} \right) + B(F_r) + C \left(\frac{V}{(gv)^{1/3}} \right) + D \quad (4.1)$$

ou

$$B = A \left(\frac{u_{*b}}{(gv)^{1/3}} \right) + B(F_r) + C \quad (4.2)$$

onde os valores numéricos de A, B, C e D são obtidos pelo melhor ajuste da equação de regressão.

O parâmetro de resistência B obtido com os dados experimentais será identificado como B_o enquanto o valor do parâmetro obtido através das equações (4.1) ou (4.2), será denominado de B_c .

Os resultados da análise estão apresentados na forma de tabelas e gráficos. A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos através dos dados selecionados de acordo com a fonte dos dados, o regime de resistência, a largura do canal b em metros, o diâmetro mediano de cada mistura D_{50} , o número de ensaios para cada conjunto de dados, os coeficientes da regressão A , B , C e D e os valores dos coeficientes de determinação R^2 entre B_o e B_c para cada mistura analisada.

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos, seguindo o mesmo ordenamento da Tabela 4.1, para o parâmetro de resistência B calculado em função de dois parâmetros adimensionais, existindo portanto apenas os coeficientes A , B e C para cada equação de regressão e os valores dos coeficientes de determinação R^2 entre B_o e B_c para cada mistura.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos após o agrupamento das misturas por fontes de dados e tipos de canais, seguindo o mesmo ordenamento indicado anteriormente na Tabela 4.1, e usando a equação (4.1) para o cálculo de B_c . Na Tabela 4.4 estão indicados os coeficientes de regressão após o agrupamento das misturas, para as equações obtidas em função de dois parâmetros e os valores dos coeficientes de determinação R^2 entre B_o e B_c .

As Figuras 4.1 a 4.79, mostram graficamente a relação entre os valores do parâmetro B obtidos com os dados experimentais B_o , e os valores calculados pela função de regressão linear múltipla B_c , com os respectivos valores dos coeficientes de determinação R^2 para alguns casos típicos. Uma apresentação gráfica de todos os outros casos pode ser encontrada no anexo B. As Figuras 4.1 a 4.18 indicam os resultados obtidos através dos experimentos com misturas unimodais de diferentes distribuições granulométricas mas com mesmo diâmetro mediano sem o agrupamento das misturas, e as Figuras 4.19 a 4.24, mostram os resultados após o agrupamento das misturas associadas a cada forma do leito para esse mesmo conjunto de dados. As Figuras 4.25 a 4.45 mostram os resultados obtidos através de experimentos realizados com diferentes misturas unimodais em dois canais de laboratório sem o agrupamento das misturas, e as Figuras 4.46 a 4.51 os resultados obtidos após o agrupamento destas misturas. As Figuras 4.52 e 4.53 mostram os resultados obtidos através de experimentos com uma areia muito fina, $D_{50} = 0,088$ mm, realizados sob regime de leito plano. As Figuras 4.54 a 4.67 mostram os resultados obtidos com as misturas bimodais. As

Figuras 4.68 a 4.77 mostram os resultados obtidos com dados de rios. As figuras 4.78 e 4.79 mostram os resultados do agrupamento dos dados de rios e canais de laboratório.

Tabela 4.1 – Coeficientes de regressão da equação (4.1) com três parâmetros adimensionais, obtidos com os diversos dados

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura(s)	D_{50} (mm)	Número		A	B	C	D	R^2
					de	ensaios					
Guy <i>et al.</i> (1966)	Ripples	2,44	1	0,19	11	-5,500	-0,860	0,160	4,050	0,970	
			2	0,27	4						
			3	0,28	7	-8,000	4,760	0,400	0,520	0,980	
			4	0,45	14	-10,438	4,261	0,401	2,739	0,975	
		0,61	5	0,32	3						
			6	0,33	3						
			7	0,47	6	-1,545	12,871	-0,141	-0,014	0,994	
			8	0,54	2						
	0,61 e 2,44	Todas	-	50	-1,997	5,302	-0,093	2,853	0,773		
	Dunas	2,44	1	0,19	12	-2,410	3,080	0,110	-0,240	0,980	
			2	0,27	9	-1,860	3,660	0,080	-1,070	0,990	
			3	0,28	16	-2,020	4,380	0,080	-1,020	0,990	
			4	0,45	11	1,905	-3,157	0,225	-0,400	0,929	
		0,61	9	0,93	19	1,758	-2,351	0,241	-1,732	0,900	
			5	0,32	13	-1,620	0,427	0,091	-0,021	0,932	
			6	0,33	7	-1,046	26,746	-0,162	-8,397	0,982	
			7	0,47	27	-1,411	3,993	0,058	-1,016	0,814	
8	0,54	15	-0,783	3,203	0,052	-2,563	0,925				
0,61 e 2,44	Todas	-	129	-1,209	4,465	0,038	-1,103	0,773			
Leito plano	2,44	1	0,19	7	-11,800	-5,670	0,470	11,900	0,940		

Tabela 4.1 – continuação.

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura (s)	D_{50} (mm)	Número de ensaios	A	B	C	D	R^2	
Guy <i>et al.</i> (1966)	Leito plano	2,44	2	0,27	2						
			3	0,28	6	6,140	6,150	-0,730	12,560	0,990	
			4	0,45	3						
			9	0,93	13	3,615	-11,460	0,381	4,843	0,950	
		0,61	5	0,32	4						
			6	0,33	3						
			7	0,47	6	-0,421	1,622	-0,012	0,089	0,999	
			8	0,54	4						
0,61 e 2,44	Todas	-	48	-0,485	13,620	-0,280	5,689	0,759			
Srinivasan (1969)	Leito plano	0,6	1	0,09	52	-4,570	2,330	0,161	1,535	0,997	
Samaga <i>et al.</i> (1986)	Dunas	0,2	1	0,58	9	2,132	-1,278	0,067	-1,261	0,995	
			2	0,55	9	1,986	-1,066	0,056	-1,075	0,976	
			3	0,42	9	1,917	-1,621	0,101	-0,349	0,995	
			4	0,256	6	3,038	-1,035	0,046	-1,435	0,977	
			Todas	-	33	-0,628	3,939	-0,017	-1,502	0,834	
	<i>Ripples</i>	0,5	1	0,35	7	-1,448	6,821	0,103	-3,077	0,991	
Cavalcante (1992)	Dunas	0,5	1	0,35	12	-1,163	4,487	0,072	-2,558	0,966	
			2	0,74	11	-0,461	5,787	0,005	-2,836	0,961	
			Todas	-	23	-0,319	5,981	-0,070	-2,227	0,639	
	Leito plano	0,5	1	0,35	12	-1,294	2,414	0,066	-1,062	0,999	
			Todas	-	16	-0,610	4,346	0,017	-2,903	0,892	

Tabela 4.1 – continuação.

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura(s)	D_{50} (mm)	Número					R^2
					de	A	B	C	D	
Siqueira (1997)	<i>Ripples</i>	0,5	1	0,38	16	-1,486	8,073	0,026	-2,518	0,997
			2	0,38	8	-1,077	9,986	-0,041	-2,963	0,999
			3	0,38	14	-1,227	8,643	-0,008	-2,780	0,996
			Todas	-	38	-1,381	8,367	0,013	-2,637	0,997
	Dunas	0,5	1	0,38	14	-1,063	7,395	-0,010	-2,623	0,993
			2	0,38	13	-0,988	6,529	-0,004	-2,588	0,995
			3	0,38	14	-1,266	6,568	-0,004	-1,903	0,982
			Todas	-	41	-1,062	6,602	0,003	-2,573	0,987
	Leito plano	0,5	1	0,38	9	-1,381	2,334	0,062	-0,697	0,997
			2	0,38	8	-1,365	2,440	0,057	-0,673	0,999
			3	0,38	8	-1,575	1,849	0,070	0,054	0,999
			Todas	-	25	-1,489	1,983	0,069	-0,300	0,996
Julien & Raslan (1998)	Leito plano	1,3	1	0,2	11	-3,047	2,187	0,140	0,333	0,991
			2	0,4	7	-1,761	1,582	0,155	-0,917	0,997
			3	0,6	10	-2,355	1,815	0,114	0,581	0,996
¹ Medeiros (1999)	Dunas	0,5	1	0,62	24	-1,275	4,477	0,047	-1,587	0,986
			2	0,37	26	-1,320	4,322	0,062	-2,208	0,988
			3	1,60	26	-1,458	4,839	0,048	-0,508	0,999
			Todas	-	76	-1,463	11,011	0,086	-4,983	0,497
	Leito plano	0,5	2	0,37	10	-1,956	2,441	0,074	0,348	0,999
			3	1,60	10	-1,909	3,483	0,042	1,779	0,999
			2 e 3	-	20	-6,903	-32,446	1,215	0,960	0,648

¹ Dados obtidos com misturas bimodais.

Tabela 4.1 – continuação.

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura(s)	D_{50} (mm)	Número					R^2
					de	A	B	C	D	
² Karim (1995, 1999)	Dunas	-	1	-	7	0,649	18,791	-0,031	-4,637	0,736
		-	2	-	8	-0,548	7,842	-0,046	0,164	0,981
		-	3	-	8	-0,199	-11,707	0,067	-5,817	0,235
		-	4	-	10	-1,968	10,823	0,084	-3,197	0,998
		-	1 a 4	-	33	-1,557	13,106	0,012	-0,367	0,980

² Dados obtidos em rios.

Tabela 4.2 – Coeficientes de regressão da equação (4.2) com dois parâmetros adimensionais, obtidos com os diversos dados

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura(s)	D_{50} (mm)	Número				R^2
					de	A	B	C	
					ensaios				
Guy <i>et al.</i> (1966)	<i>Ripples</i>	2,44	1	0,19	11	-3,479	-3,370	5,623	0,963
			2	0,27	4	-3,917	1,695	4,416	0,914
			3	0,28	7	-2,669	2,458	2,676	0,897
			4	0,45	14	-3,758	-0,092	5,045	0,794
		0,61	5	0,32	3				
			6	0,33	3				
			7	0,47	6	-1,638	7,569	-0,200	0,994
			8	0,54	2				
	0,61 e 2,44	Todas	-	50	-2,196	3,632	2,331	0,756	
	<i>Dunas</i>	2,44	1	0,19	12	-0,832	5,126	-1,209	0,612
			2	0,27	9	-1,005	7,001	-2,192	0,900
			3	0,28	16	-1,011	7,813	-2,526	0,965
			4	0,45	11	-1,287	4,189	0,205	0,773
		0,61	9	0,93	19	-1,261	0,918	3,031	0,879
			5	0,32	13	-1,001	6,070	-1,651	0,903
6			0,33	7	-1,860	15,689		0,965	
7			0,47	27	-1,187	5,386	-0,794	0,799	
0,61 e 2,44	Todas	-	129	-1,033	5,922	-1,175	0,761		
<i>Leito plano</i>	2,44	1	0,19	7	-3,883	-11,949	18,330	0,934	

Tabela 4.2 – continuação.

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura(s)	D_{50} (mm)	Número				R ²
					de	A	B	C	
Guy <i>et al.</i> (1966)	Leito plano	2,44	2	0,27	2				
			3	0,28	6	-2,167	-4,891	10,147	0,942
			4	0,45	3				
			9	0,93	13	-5,710	1,974	7,919	0,886
		0,61	5	0,32	4	-3,656	33,347	-5,835	0,994
			6	0,33	3				
			7	0,47	6	-0,501	1,905	-0,425	0,998
			8	0,54	4	-6,009	148,427	-66,979	0,987
0,61 e 2,44	Todas	-	48	-2,776	6,725	5,765	0,687		
Srinivasan (1969)	Leito plano	0,6	1	0,088	52	-3,295	6,268	2,870	0,925
Samaga <i>et al.</i> (1986)	Dunas	0,2	1	0,59	9	-0,639	3,741	-1,692	0,943
			2	0,55	9	-1,061	4,446	-1,167	0,866
			3	0,42	9	-0,605	3,313	-1,737	0,803
			4	0,256	6	-0,630	2,494	-1,288	0,730
			Todas	-	33	-0,752	3,513	-1,334	0,831
	<i>Ripples</i>	0,5	1	0,35	7	-1,153	7,819	-2,474	0,964
Cavalcante (1992)	Dunas	0,5	1	0,35	12	-0,974	5,555	-2,002	0,928
			2	0,74	11	-0,468	5,719	-2,885	0,960
			Todas	-	23	-0,408	4,804	-2,931	0,593
	Leito plano	0,5	1	0,35	12	-0,768	5,164	-2,539	0,883
			2	0,74	4	-0,673	3,759	-1,591	0,998
			Todas	-	16	-0,635	4,957	-2,767	0,877

Tabela 4.2 – continuação.

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura(s)	D_{50} (mm)	Número				
					de	A	B	C	R^2
Siqueira (1997)	<i>Ripples</i>	0,5	1	0,38	16	-1,470	8,920	-2,440	0,993
			2	0,38	8	-1,370	8,420	-2,480	0,974
			3	0,38	14	-1,230	8,280	-2,780	0,986
			Todas	-	38	-1,370	8,880	-2,620	0,988
	Dunas	0,5	1	0,38	14	-1,080	7,040	-2,630	0,987
			2	0,38	13	-0,990	6,370	-2,590	0,991
			3	0,38	14	-1,270	6,440	-1,920	0,978
			Todas	-	41	-1,060	6,270	-2,570	0,986
	Leito plano	0,5	1	0,38	9	-0,980	3,980	-1,210	0,926
			2	0,38	8	-1,070	4,092	-1,031	0,928
			3	0,38	8	-1,320	2,730	1,080	0,976
			Todas	-	25	-1,120	3,510	-0,380	0,958
Julien & Raslan (1998)	Leito plano	1,3	1	0,20	11	-2,188	3,431	1,970	0,829
			2	0,40	7	-1,365	4,385	-0,434	0,978
			3	0,60	10	-1,573	5,385	-0,622	0,886
³ Medeiros (1999)	Dunas	0,5	1	0,62	24	-1,285	6,041	-1,264	0,983
			2	0,37	26	-1,294	6,663	-1,994	0,984
			3	1,60	26	-1,447	6,833	-0,415	0,994
			Todas	-	76	-1,454	14,306	-4,654	0,496
	Leito plano	0,5	2	0,37	10	-2,249	7,556	-0,389	0,999
			3	1,60	10	-1,774	4,834	1,766	0,999
			2 e 3	-	20	-2,252	7,559	-0,387	0,614

³ Dados obtidos com misturas bimodais.

Tabela 4.2 – continuação.

Fonte dos dados	Regime	b (m)	Mistura(s)	D_{50} (mm)	Número de ensaios	A	B	C	R^2
⁴ Karim (1995, 1999)	Dunas	-	1	-	7	-0,534	13,654	-2,925	0,667
		-	2	-	8	-34,742	6,529	-0,156	0,976
		-	3	-	8	0,426	18,216	-6,917	0,103
		-	4	-	10	-0,957	24,016	-4,729	0,990
		-	1 a 4	-	33	-0,700	12,675	-2,203	0,932

⁴ Dados obtidos em grandes rios.

Tabela 4.3 – Coeficientes de regressão da equação (4.1) com três parâmetros adimensionais para dados agrupados

Fonte dos dados	Regime	Número de ensaios	A	B	C	D	R ²
Guy <i>et al.</i> (1966), Cavalcante (1992) e Siqueira (1997)	<i>Ripples</i>	95	-2,354	11,999	-0,055	-0,329	0,867
Guy <i>et al.</i> (1966), Samaga <i>et al.</i> (1986), Cavalcante (1992) e Siqueira (1997)	Dunas	226	-1,319	2,871	0,076	-1,307	0,753
⁵ Guy <i>et al.</i> (1966), Samaga <i>et al.</i> (1986), Cavalcante (1992), Karim (1995, 1999) e Siqueira (1997)	Dunas	259	-1,132	3,843	0,026	-0,880	0,627
Guy <i>et al.</i> (1966), Srinivasan (1969), Cavalcante (1992), Siqueira (1997), Julien & Raslan (1998)	Leito plano	169	-1,932	-0,021	-0,043	7,375	0,570
⁶ Guy <i>et al.</i> (1966), Srinivasan (1969), Cavalcante (1992), Siqueira (1997), Julien & Raslan (1998)	Leito plano	152	-2,617	2,510	-0,045	6,486	0,694
Samaga <i>et al.</i> (1986) - ($D_{50} \cong 0,60$ mm)	Dunas	18	-1,087	1,892	0,062	-0,799	0,984
Guy <i>et al.</i> (1966) - ($D_{50} \cong 0,50$ mm)	Dunas	53	-1,258	4,167	0,062	-1,500	0,825
Samaga <i>et al.</i> (1986), Cavalcante (1992) e Siqueira (1997) - ($D_{50} \cong 0,40$ mm)	Dunas	62	-1,242	3,328	0,088	-2,379	0,967
Guy <i>et al.</i> (1966) e Samaga <i>et al.</i> (1986) - ($D_{50} \cong 0,30$ mm)	Dunas	51	-1,803	3,834	0,078	-1,000	0,913
Guy <i>et al.</i> (1966) - ($D_{50} \cong 0,50$ mm)	Leito plano	13	-2,437	-4,235	0,068	10,445	0,842
Cavalcante (1992), Siqueira (1997) e Julien & Raslan (1998) - ($D_{50} \cong 0,40$ mm)	Leito plano	35	-1,819	1,753	0,089	0,203	0,990
Guy <i>et al.</i> (1966) - ($D_{50} \cong 0,30$ mm)	Leito plano	15	0,851	22,512	-0,492	5,355	0,935
Guy <i>et al.</i> (1966) e Julien & Raslan (1998) - ($D_{50} \cong 0,20$ mm)	Leito plano	18	-6,447	-4,588	0,123	13,627	0,937

⁵ Dados de canais de laboratório e rios.⁶ Excluídos os dados do canal de 0,61 m de largura utilizado por Guy *et al.* (1966).

Tabela 4.4 – Coeficientes de regressão da equação (4.2) com dois parâmetros adimensionais para dados agrupados

Fonte dos dados	Regime	Número de ensaios	A	B	C	R ²
Guy <i>et al.</i> (1966), Cavalcante (1992) e Siqueira (1997)	<i>Ripples</i>	95	-2,461	10,780	-0,555	0,864
Guy <i>et al.</i> (1966), Samaga <i>et al.</i> (1986), Cavalcante (1992) e Siqueira (1997)	Dunas	226	-1,028	4,788	-1,011	0,669
⁷ Guy <i>et al.</i> (1966), Samaga <i>et al.</i> (1986), Cavalcante (1992), Karim (1995, 1999) e Siqueira (1997)	Dunas	259	-0,892	2,821	-0,219	0,485
Guy <i>et al.</i> (1966), Srinivasan (1969), Cavalcante (1992), Siqueira (1997), Julien & Raslan (1998)	Leito plano	169	-2,196	-0,662	6,963	0,561
⁸ Guy <i>et al.</i> (1966), Srinivasan (1969), Cavalcante (1992), Siqueira (1997), Julien & Raslan (1998)	Leito plano	152	-2,698	1,177	6,137	0,679
Samaga <i>et al.</i> (1986) - ($D_{50} \cong 0,60$ mm)	Dunas	18	-0,673	3,380	-1,337	0,962
Guy <i>et al.</i> (1966) - ($D_{50} \cong 0,50$ mm)	Dunas	53	-0,945	6,019	-1,580	0,808
Samaga <i>et al.</i> (1986), Cavalcante (1992) e Siqueira (1997) - ($D_{50} \cong 0,40$ mm)	Dunas	62	-1,037	5,970	-2,228	0,932
Guy <i>et al.</i> (1966) e Samaga <i>et al.</i> (1986) - ($D_{50} \cong 0,30$ mm)	Dunas	51	-1,311	5,055	-0,437	0,806
Guy <i>et al.</i> (1966) - ($D_{50} \cong 0,50$ mm)	Leito plano	13	-1,947	-1,676	9,804	0,837
Cavalcante (1992), Siqueira (1997) e Julien & Raslan (1998) - ($D_{50} \cong 0,40$ mm)	Leito plano	35	-1,511	4,111	0,311	0,948
Guy <i>et al.</i> (1966) - ($D_{50} \cong 0,30$ mm)	Leito plano	15	-3,650	12,322	4,870	0,805
Guy <i>et al.</i> (1966) e Julien & Raslan (1998) - ($D_{50} \cong 0,20$ mm)	Leito plano	18	-4,671	-6,662	15,613	0,931

⁷ Dados de canais de laboratório e rios.⁸ Excluídos os dados do canal de 0,61 m de largura utilizado por Guy *et al.* (1966).

4.2.1 – Resultados obtidos através dos dados coletados por Siqueira (1997)

Siqueira (1997) utilizou três misturas unimodais com diferentes distribuições granulométricas porém com mesmo diâmetro mediano ($D_{50} = 0,38$ mm).

Os valores do parâmetro de resistência B, denominado de B_o , foram calculados através dos dados observados nos ensaios pela equação (3.10). Com o auxílio da análise dimensional e da técnica da regressão linear múltipla, foi estabelecida a relação funcional proposta na equação (3.17) entre o parâmetro de resistência B e os parâmetros adimensionais $u_*b/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$.

Para *ripples* como forma do leito dos 38 experimentos realizados, 16 ensaios foram obtidos com a primeira mistura, oito ensaios com a segunda mistura e 14 ensaios com a terceira mistura. As Figuras 4.1 a 4.3 mostram os valores calculados de B_o e B_c , além da reta de igual valor, e os coeficientes de determinação R^2 , para cada mistura associada a uma forma do leito. Os resultados obtidos usando os dados de Siqueira (1997) foram excelentes para *ripples* como forma do leito, com valores do coeficiente de determinação R^2 , variando entre 0,996 e 0,999. A análise gráfica também indica um excelente ajuste da relação funcional obtida através dos parâmetros de resistência B_o e B_c , cujos coeficientes das equações de regressão obtidas A, B, C e D apresentaram pequena variação quando comparados com os valores obtidos para outra mistura, associada à mesma forma do leito e tipo de canal.

No caso de dunas como regime de resistência, as Figuras 4.4 a 4.6 mostram os valores de B_o e B_c calculados pelas equações (3.10) e (3.17), respectivamente. A reta de igual valor também é indicada. Os coeficientes de determinação R^2 entre B_o e B_c variaram entre 0,982 e 0,995. Este é o conjunto de dados, obtido por Siqueira (1997), que apresenta o maior número de ensaios, totalizando 41 experimentos, sendo 14 experimentos usando a primeira mistura, 13 experimentos usando a segunda mistura e 14 experimentos com a terceira mistura.

Foi possível observar através da Tabela 4.1 que os coeficientes A, B, C e D, obtidos com auxílio da técnica de regressão, praticamente não variaram para as três misturas utilizadas por Siqueira (1997).

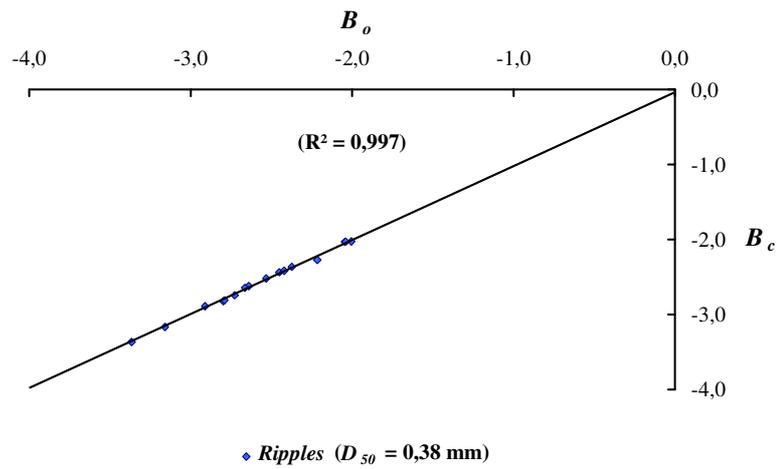


Figura 4.1 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para ripples – Mistura 1 com três parâmetros.

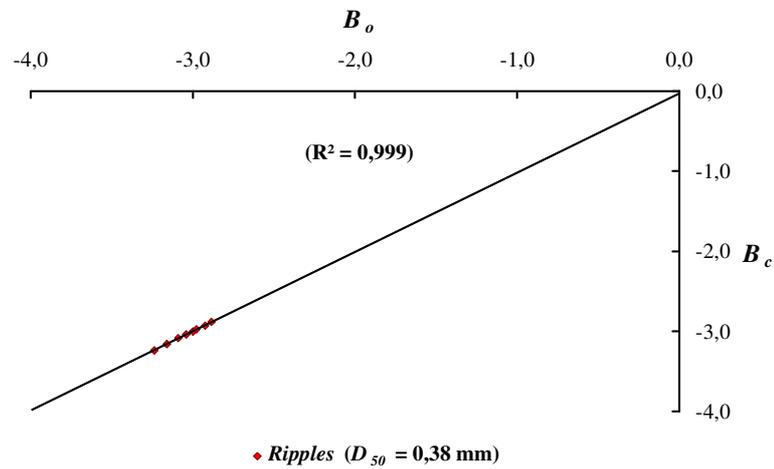


Figura 4.2 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para ripples – Mistura 2 com três parâmetros.

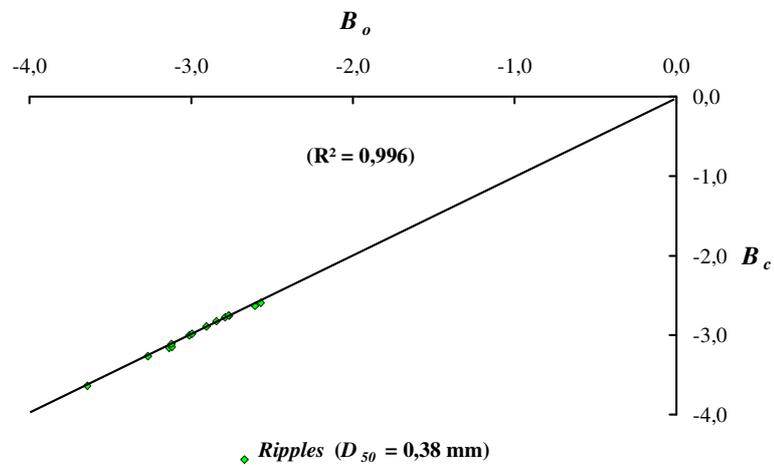


Figura 4.3 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para ripples – Mistura 3 com três parâmetros.

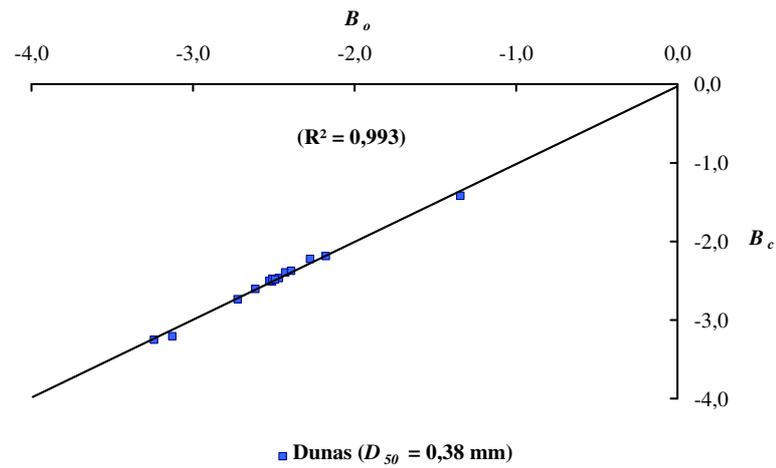


Figura 4.4 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com três parâmetros.

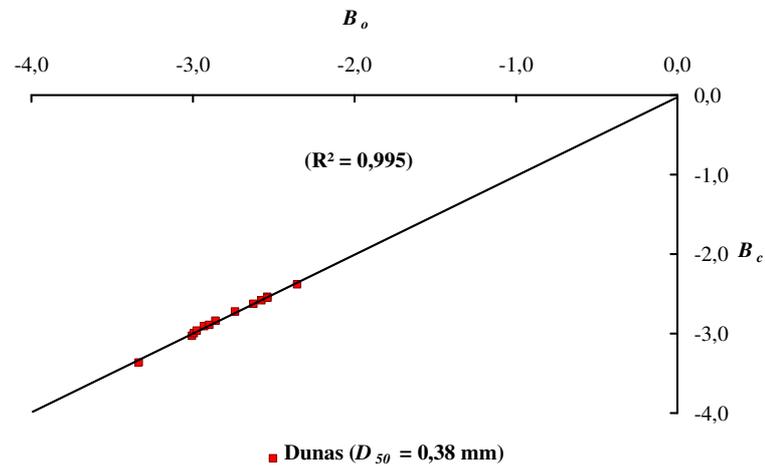


Figura 4.5 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com três parâmetros.

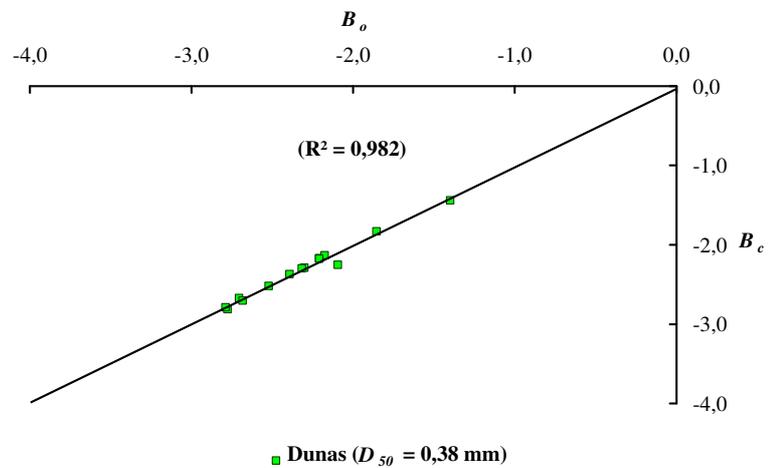


Figura 4.6 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas – Mistura 3 com três parâmetros.

Para o leito plano como regime de resistência, 25 ensaios foram analisados, sendo nove ensaios referentes à primeira mistura, oito ensaios com a segunda e oito ensaios com a terceira mistura. A análise das equações de regressão permitiu identificar uma variação um pouco maior que nos casos de *ripples* e dunas como formas do leito para os valores dos coeficientes A , B , C e D destas equações quando obtidas em função de três parâmetros adimensionais. Mesmo assim, quando as misturas foram analisadas isoladamente foi possível verificar um ótimo ajuste entre os parâmetros de resistência B_o e B_c também confirmado através dos coeficientes de determinação R^2 que variaram entre 0,997 e 0,999. As Figuras 4.7 a 4.9 mostram os valores de B_o obtidos pela equação (3.10), os valores de B_c calculados pela equação (3.17) e os valores dos coeficientes de determinação R^2 para as três misturas analisadas.

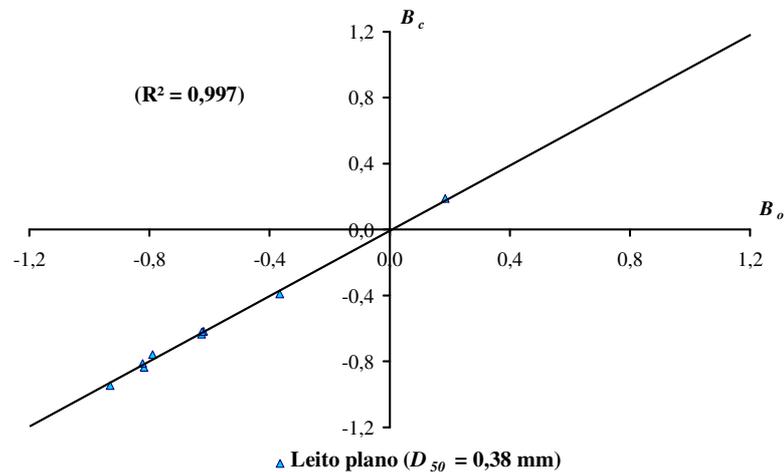


Figura 4.7 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano – Mistura 1 com três parâmetros.

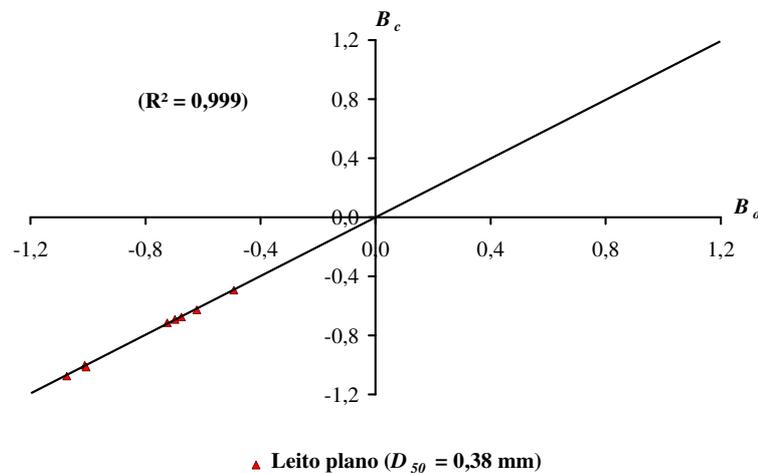


Figura 4.8 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano – Mistura 2 com três parâmetros.

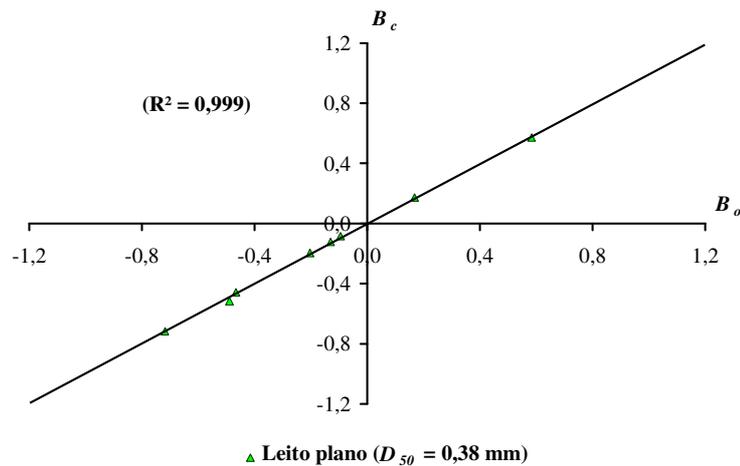


Figura 4.9 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano – Mistura 3 com três parâmetros.

As Figuras 4.10 a 4.18 representam os valores de B_o e B_c também calculados através das equações (3.10) e (3.17), respectivamente, para *ripples*, dunas e leito plano. As relações funcionais em função de dois parâmetros forneceram um excelente ajuste para o parâmetro de resistência B, onde os coeficientes de determinação R^2 para as três misturas estão indicados nas Tabelas 4.1 e 4.2. Os coeficientes das equações de regressão ajustadas mostram uma pequena variação para as três misturas analisadas no caso de *ripples* e dunas. Para leito plano como regime de resistência, os valores dos coeficientes das equações de regressão apresentaram uma variação um pouco maior do que no caso de *ripples* e dunas.

As relações representadas nestes gráficos mostraram uma tendência semelhante entre as misturas para a mesma forma do leito, indicando a possibilidade de agrupamento dos dados das três misturas para a mesma forma do leito. Após a análise destes dados para as três misturas isoladas, os dados foram agrupados e obteve-se uma relação funcional para a determinação da resistência associada não mais ao tipo de mistura, mas apenas a forma do leito. Estas relações são apresentadas nas Figuras 4.19 a 4.21, as quais mostram os valores dos parâmetros de resistência B calculados através das equações (3.10) e (3.17) associadas a cada forma do leito após o agrupamento dos dados.

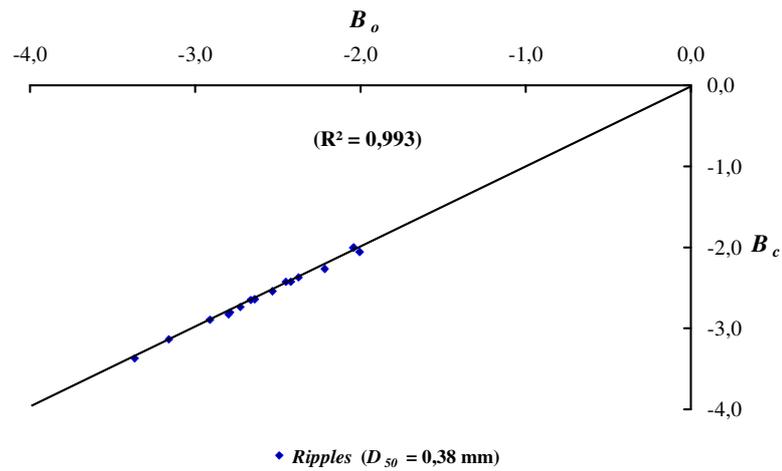


Figura 4.10 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para *ripples* – Mistura 1 com dois parâmetros.

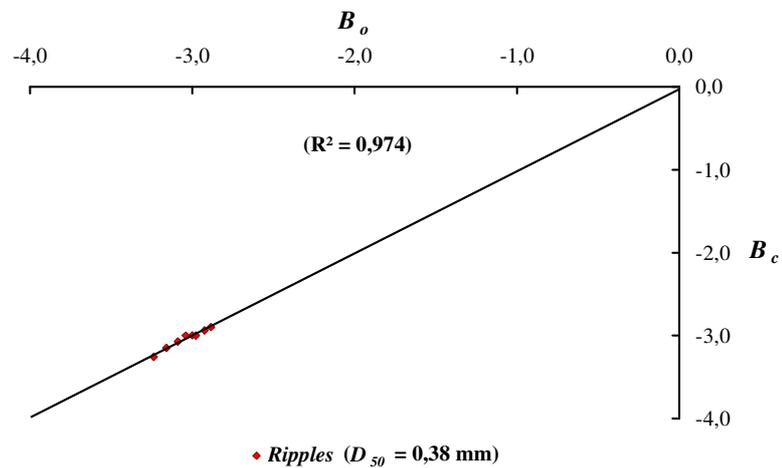


Figura 4.11 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para *ripples* – Mistura 2 com dois parâmetros.

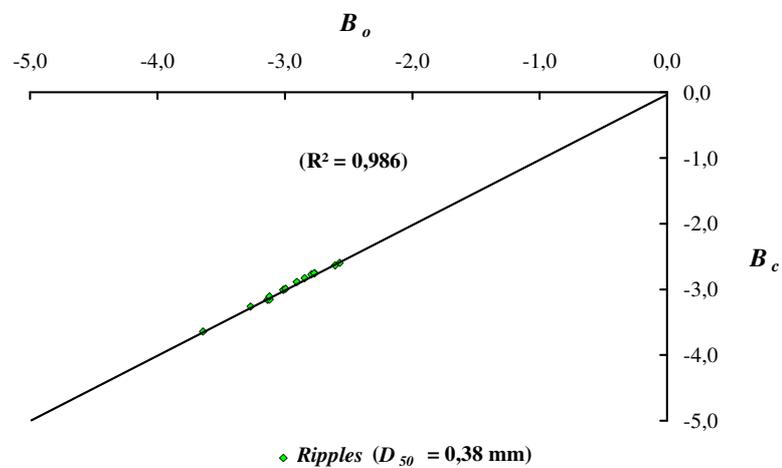


Figura 4.12 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para *ripples* – Mistura 3 com dois parâmetros.

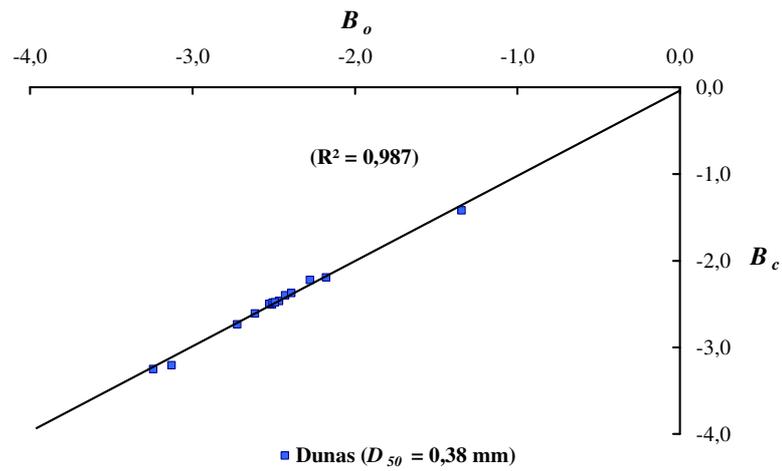


Figura 4.13 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com dois parâmetros.

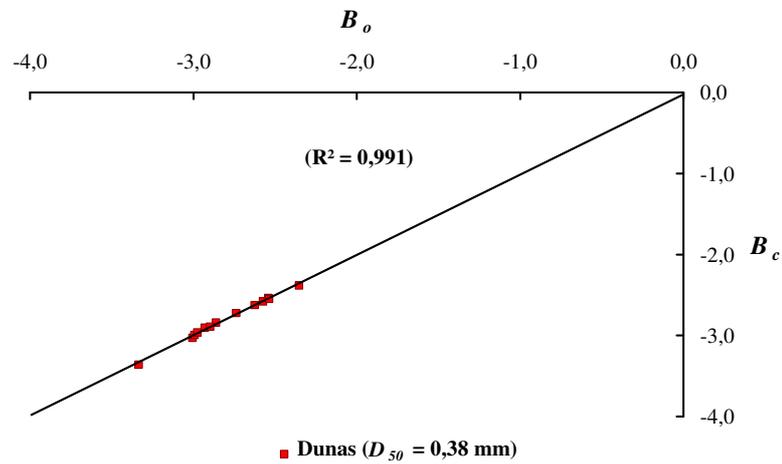


Figura 4.14 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com dois parâmetros.

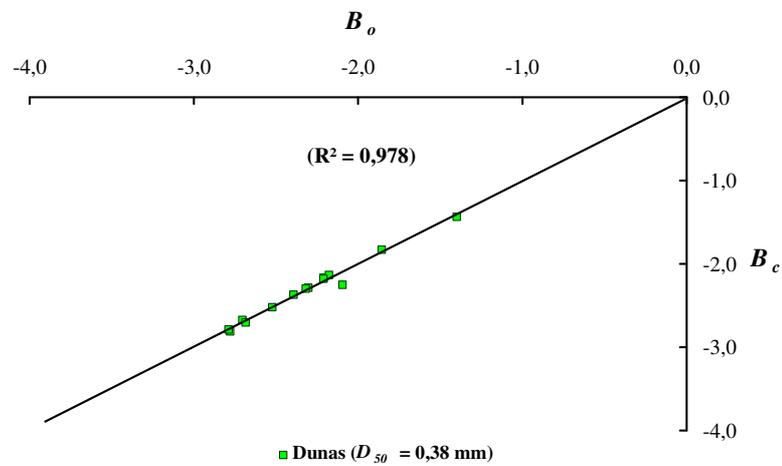


Figura 4.15 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas – Mistura 3 com dois parâmetros.

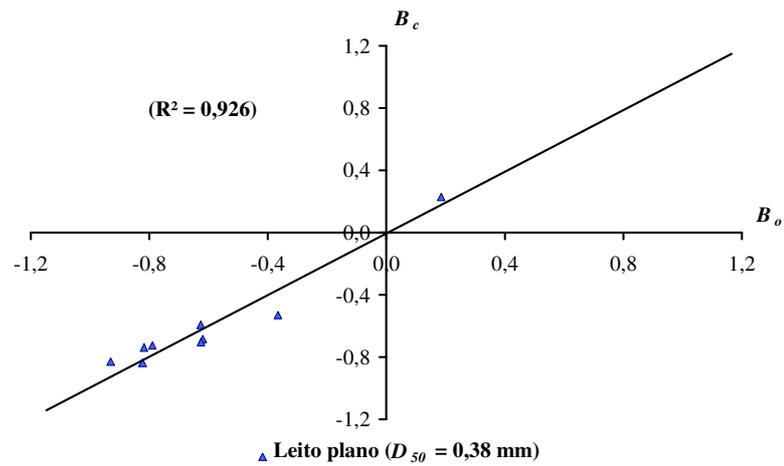


Figura 4.16 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano - Mistura 1 com dois parâmetros.

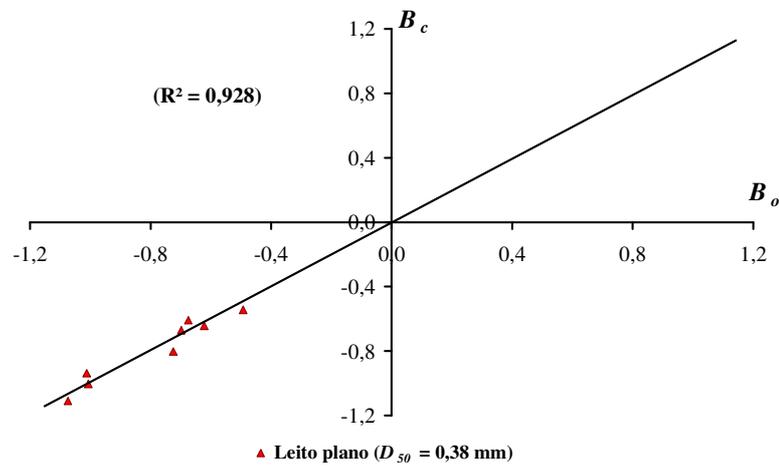


Figura 4.17 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano - Mistura 2 com dois parâmetros.

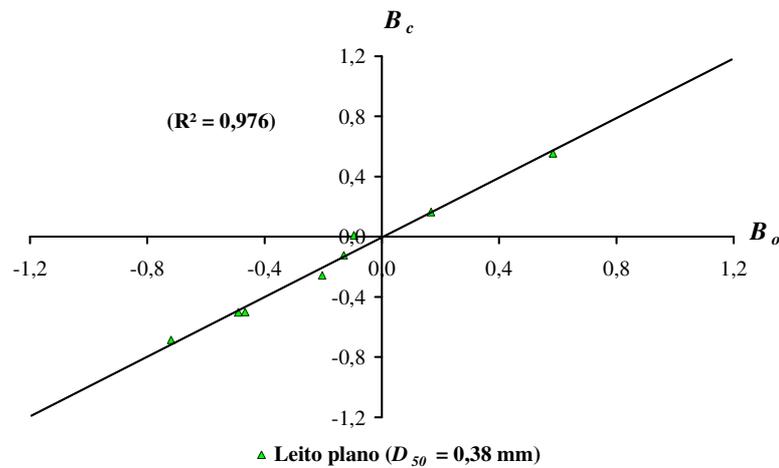


Figura 4.18 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano - Mistura 3 com dois parâmetros.

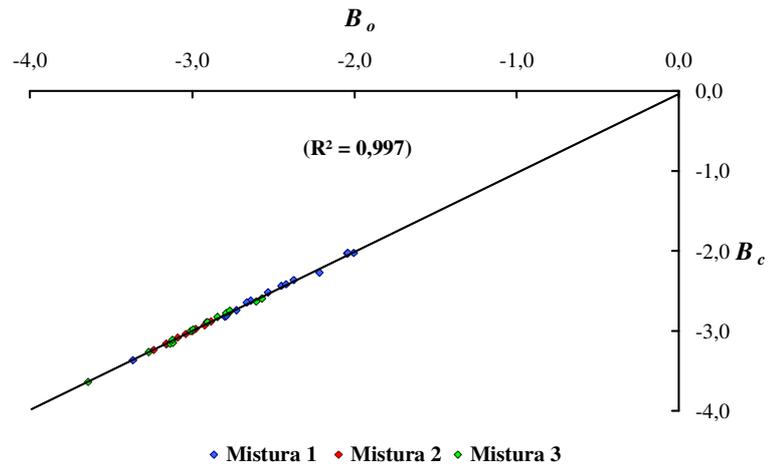


Figura 4.19 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para *ripples* com dados agrupados com três parâmetros.

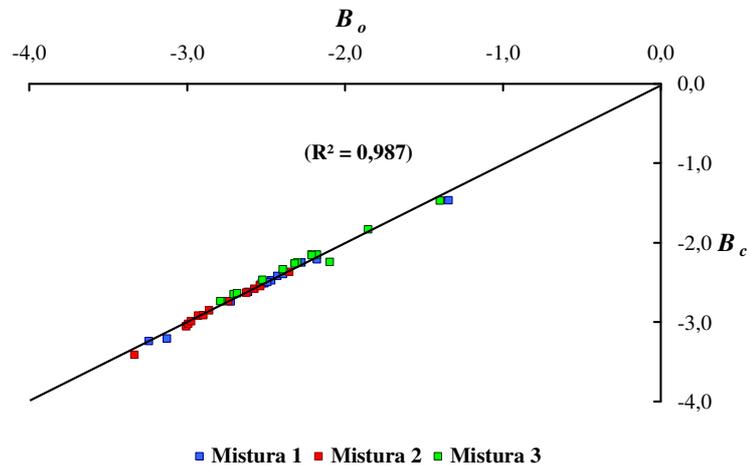


Figura 4.20 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas com dados agrupados com três parâmetros.

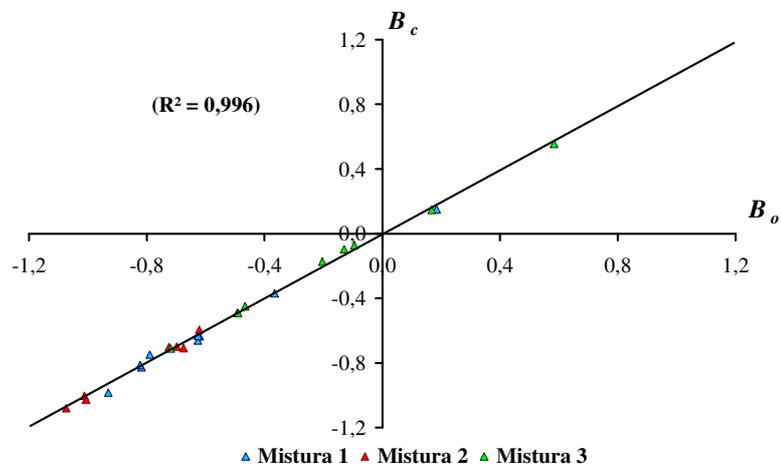


Figura 4.21 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com três parâmetros.

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 indicam os valores dos parâmetros de resistência B calculados pelas equações (3.10) e (3.17) após agrupamento dos dados sempre associados às formas do leito. Os resultados obtidos com os dados agrupados para as três misturas confirmam a tendência observada para os dados utilizados isoladamente ou sem agrupamento para *ripples* e dunas. Para *ripples* e dunas como formas do leito, os valores dos coeficientes A , B e C listados na Tabela 4.2 quase não variaram quando comparados entre as demais misturas. Para leito plano como regime de resistência, apesar do coeficiente de determinação R^2 obtido após o agrupamento dos dados apresentar um valor próximo da unidade, os valores dos coeficientes de regressão indicaram uma variação maior do que nos casos de *ripples* e dunas, o que pode ser confirmado graficamente na Figura 4.24 através da dispersão dos valores de B_o e B_c .

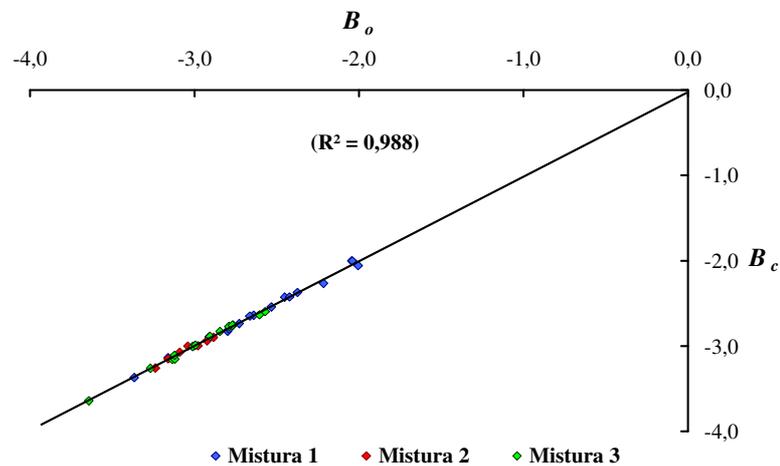


Figura 4.22 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para *ripples* com dados agrupados com dois parâmetros.

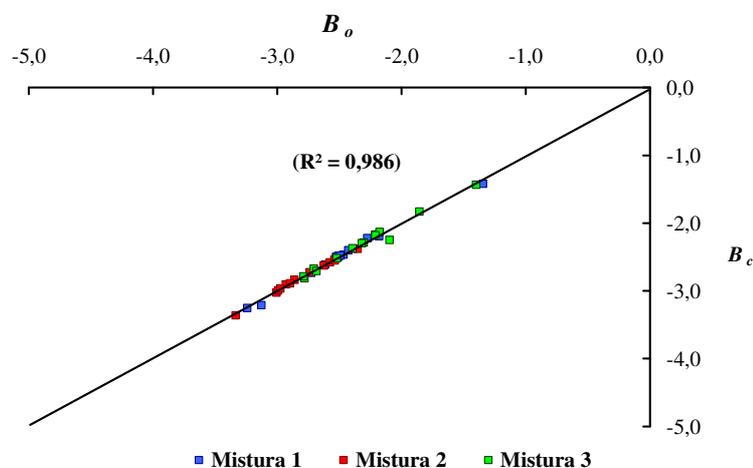


Figura 4.23 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas com dados agrupados com dois parâmetros.

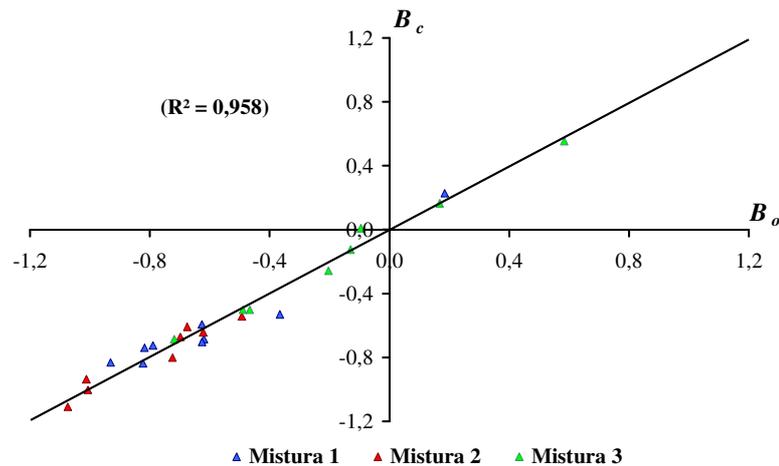


Figura 4.24 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com dois parâmetros.

Os resultados obtidos após o agrupamento dos dados, tendo como forma do leito *ripples* e dunas, confirmam a tendência observada para os dados utilizados sem agrupamento. Para o leito plano como regime de resistência, apesar de existir uma excelente relação funcional entre os parâmetros de resistência B , após o agrupamento dos dados, com valores dos coeficientes de determinação R^2 sendo iguais a 0,996, quando B_c foi calculado em função de três parâmetros adimensionais e 0,958 quando B_c foi calculado em função de dois parâmetros adimensionais, os valores dos coeficientes de regressão e a análise gráfica, indicam a influência da distribuição granulométrica das misturas.

Para este conjunto de dados, apesar da quantidade limitada de dados, uma relação funcional consistente pode ser observada para todas as misturas com *ripples* e dunas como forma do leito. Esta relação se torna ainda mais prática com o agrupamento dos dados das diferentes misturas para uma mesma forma do leito. Na prática, isto significa que não foram significativas as diferenças entre as distribuições granulométricas das três misturas, já que todas tinham o mesmo tamanho mediano. O agrupamento dos dados de todas as três misturas para uma mesma forma do leito, não implicou numa imprecisão da relação funcional para o parâmetro B . A relação funcional unificada foi tão boa quanto às relações individuais para cada mistura especificada. Isto leva a crer que, pelo menos no caso de *ripples* e dunas, as três misturas não apresentaram diferenças significativas em termos da resistência total do canal associada a essas formas do leito. A grande vantagem da metodologia proposta é que esta avalia a resistência total do leito sem a necessidade de separação dos efeitos da resistência relativa aos grãos e das formas do leito.

Uma relação funcional ainda mais simples do parâmetro de resistência B com apenas um parâmetro adimensional $u_{*b}/(gv)^{1/3}$ foi também verificada. Neste caso, os resultados não foram satisfatórios apesar de resultar numa boa situação para alguns casos. No caso de *ripples*, as misturas 1 e 3 apresentaram baixos coeficientes de determinação R² sendo iguais a 0,31 e 0,45, respectivamente.

Para as dunas como regime de resistência, observou-se o melhor ajuste entre os parâmetros de resistência B e o parâmetro adimensional selecionado, e os coeficientes de determinação R² variaram entre 0,71 e 0,88.

Para leito plano como forma do leito, a mistura 3 foi a que melhor se ajustou e a relação funcional entre estes parâmetros apresentou o coeficiente de determinação R² igual a 0,77. As misturas 2 e 3 apresentam baixos valores do coeficiente de determinação, onde R² para leito plano como regime de resistência ficou igual a 0,11 e 0,21, respectivamente. Nestes casos, é provável que o valor de B seja praticamente constante.

4.2.2 – Resultados obtidos através dos dados coletados por Guy *et al.* (1966)

As Figuras 4.25 a 4.27 mostram os valores de B_o e B_c , a relação funcional entre B_c e os parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$ e os valores dos coeficientes de determinação R² para as misturas 1, 3 e 4 para *ripples* como forma do leito. As Figuras 4.28 a 4.30 indicam os valores de B_o e B_c , a relação funcional de B_c em função de três parâmetros adimensionais e os valores dos coeficientes de determinação R² para as misturas 2, 4 e 9 com dunas como forma do leito. As Figuras 4.31 a 4.33 mostram os resultados obtidos com leito plano como regime de resistência para as misturas 1, 3 e 9, respectivamente. Os coeficientes das equações de regressão A, B, C e D obtidos para o parâmetro de resistência B_c variaram muito para *ripples* e leito plano como regime de resistência.

No caso de dunas, a variação dos coeficientes de regressão, obtidas para o parâmetro de resistência B_c , foi menor do que a observada para *ripples* e leito plano como formas do leito e as misturas 4 e 9 foram as que apresentaram as maiores variações nos coeficientes de regressão em função de três parâmetros adimensionais.

As Figuras B.1 a B.16, no Anexo B, indicam as demais relações obtidas através dos dados de Guy *et al.* (1966) para o parâmetro de resistência B.

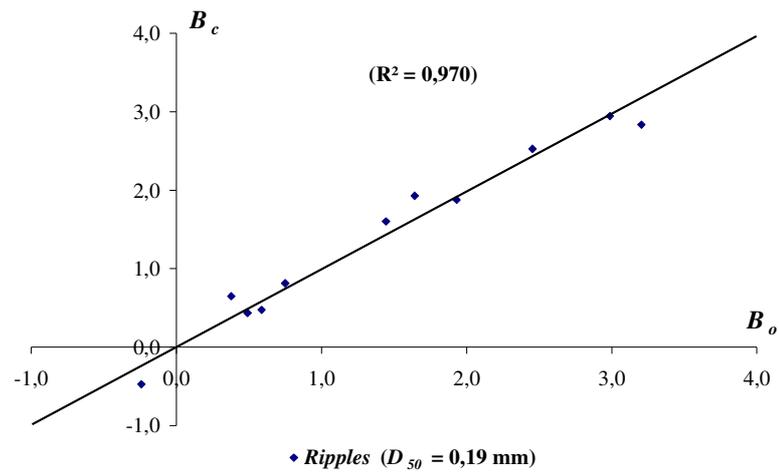


Figura 4.25 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para ripples - Mistura 1 com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

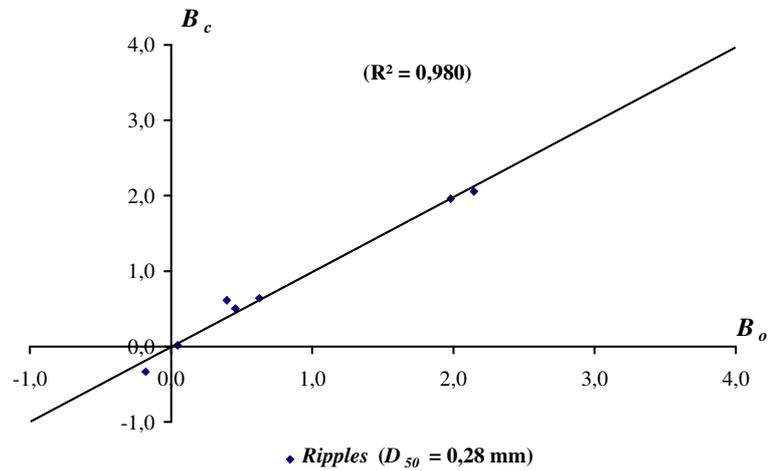


Figura 4.26 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para ripples - Mistura 3 com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

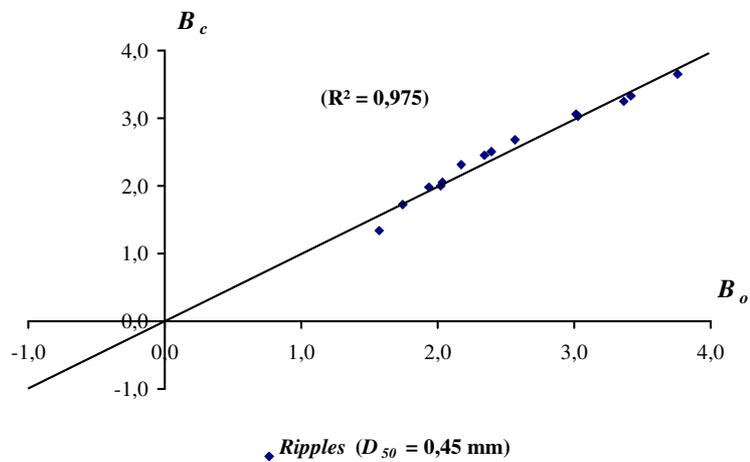


Figura 4.27 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para ripples - Mistura 4 com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

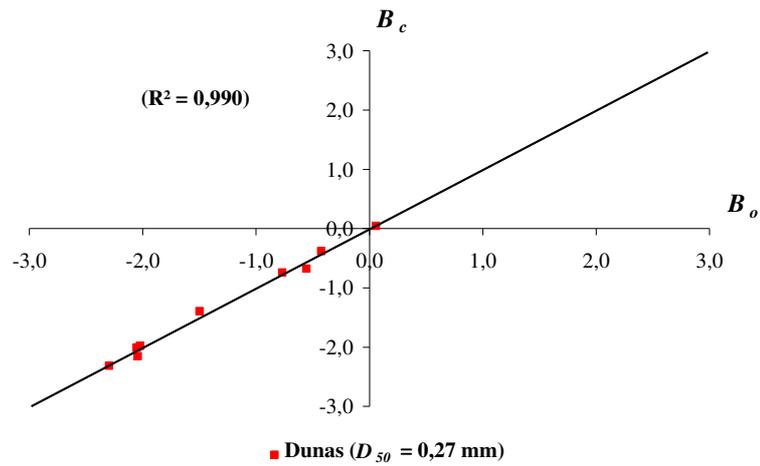


Figura 4.28 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 2 com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

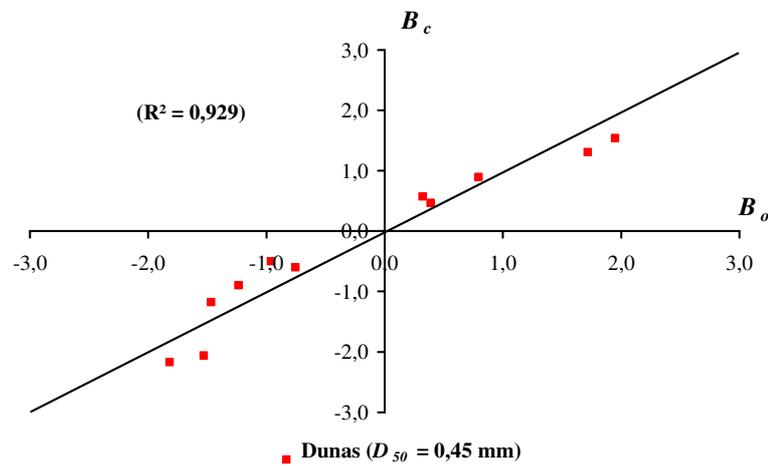


Figura 4.29 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 4 com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

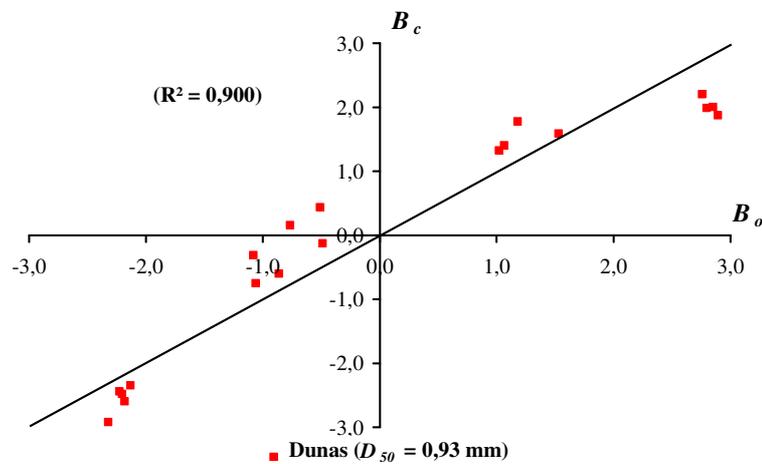


Figura 4.30 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 9 com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

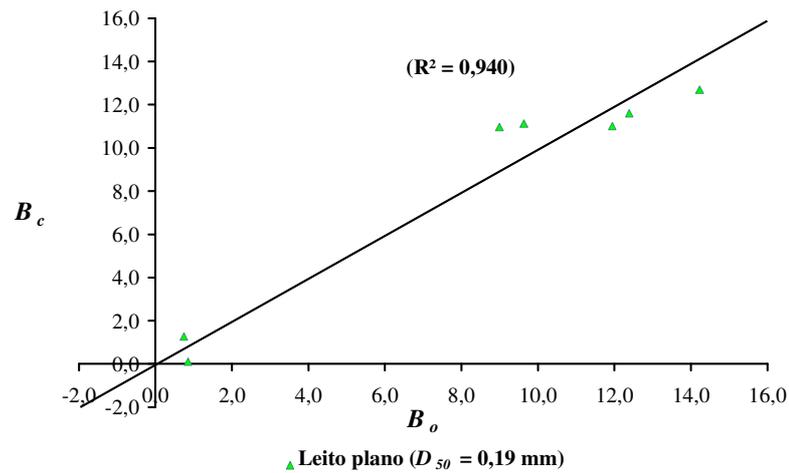


Figura 4.31 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 1 com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

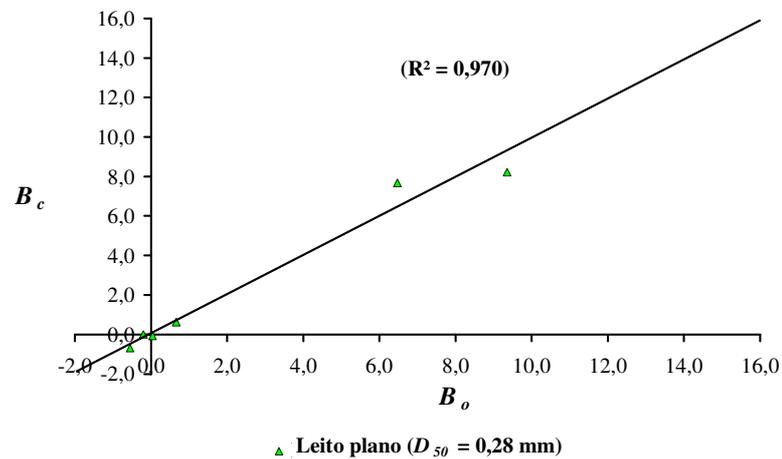


Figura 4.32 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 3 com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

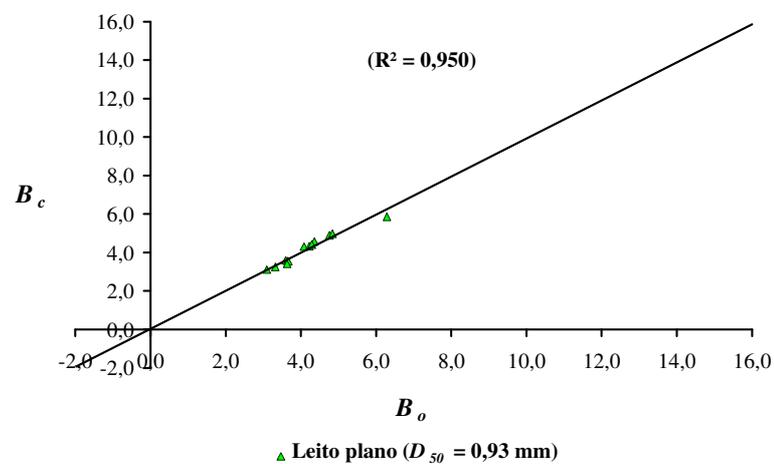


Figura 4.33 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 9 com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

Através da análise gráfica, dos valores dos coeficientes de determinação R^2 entre B_o e B_c e dos coeficientes de regressão, obtidas em função de três parâmetros para o canal com 2,44 m de largura, foi possível identificar que os melhores resultados foram obtidos com as misturas 1, 2 e 3 para *ripples* e com as misturas 2 e 3 para dunas. No caso do leito plano como forma do leito, apenas as misturas 1, 3 e 9 apresentaram a possibilidade de utilização da técnica de regressão para a obtenção das relações funcionais entre B_c e os parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$ e os resultados indicam uma grande variação dos coeficientes A , B , C e D das equações de regressão apesar dos altos valores dos coeficientes de determinação R^2 entre B_o e B_c . A análise gráfica também indica uma maior dispersão entre os valores dos parâmetros de resistência B calculados para o leito plano como regime de resistência. Para o caso de *ripples* como forma do leito, a mistura 4 foi a que apresentou o pior resultado que pode ser verificado através da análise gráfica e dos valores dos coeficientes de regressão obtidos para esta mistura. Para dunas como forma do leito, através da análise gráfica e dos valores dos coeficientes de regressão obtidos para a mistura 9, foi possível observar que esta mistura apresenta o pior ajuste entre os parâmetros de resistência B_o e B_c .

As Figuras 4.34 e 4.35 mostram os valores de B_o e B_c e os valores dos coeficientes de determinação R^2 para as misturas 1 e 4 para *ripples* como forma do leito. As Figuras 4.36 e 4.37 mostram os resultados extremos obtidos para as misturas 1 e 3 para dunas como regime de resistência e, as Figuras 4.38 e 4.39 mostram os resultados obtidos com leito plano como regime de resistência para as misturas 1 e 9, respectivamente.

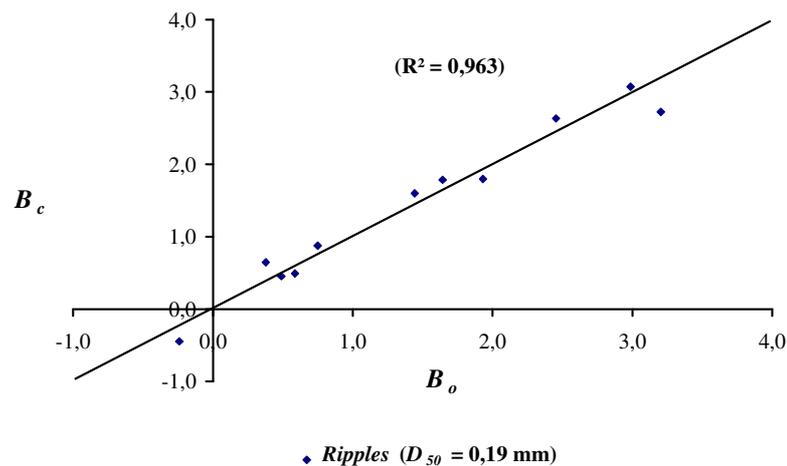


Figura 4.34 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para *ripples* - Mistura 1 com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

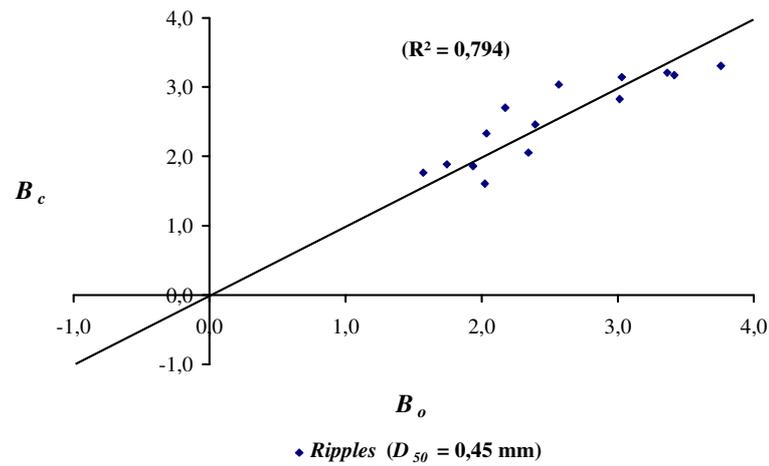


Figura 4.35 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para ripples - Mistura 4 com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

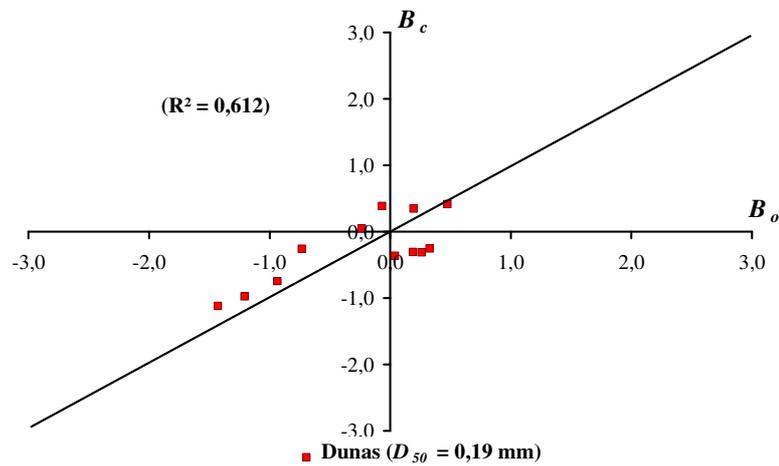


Figura 4.36 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 1 com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

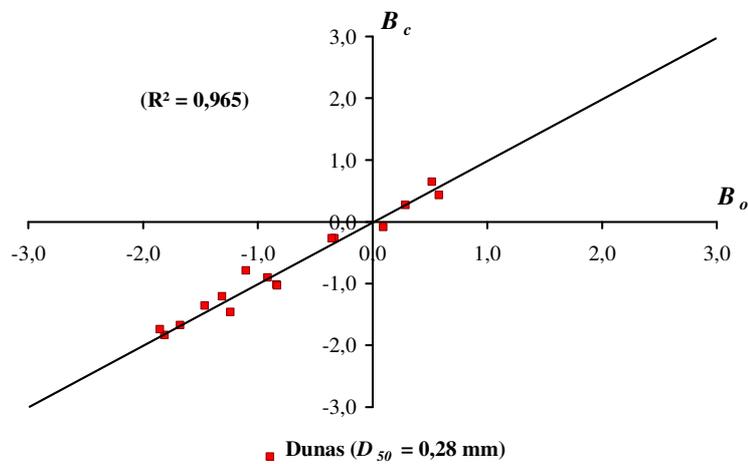


Figura 4.37 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 3 com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

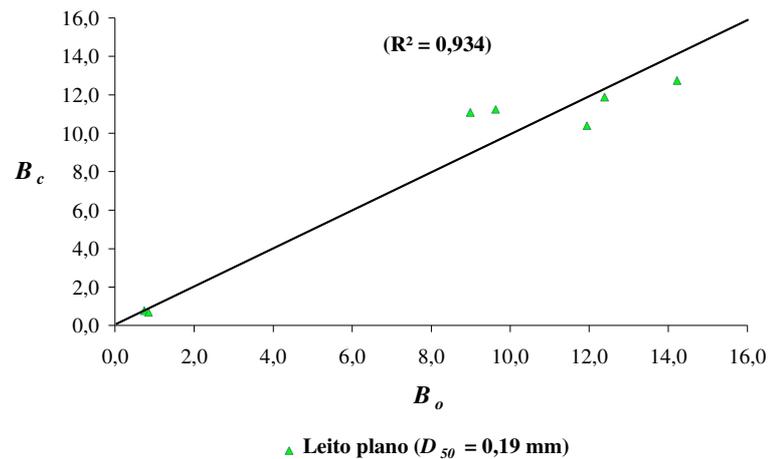


Figura 4.38 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 1 com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

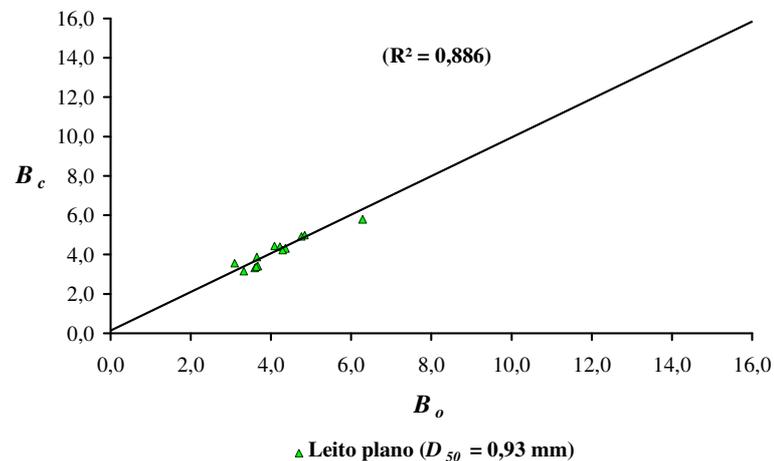


Figura 4.39 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - Mistura 9 com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

Através da análise gráfica e dos coeficientes A , B e C das equações de regressão obtidas em função de dois parâmetros adimensionais para o canal com 2,44 m de largura, foi possível identificar que o melhor resultado para *ripples* como forma do leito foi obtido com a mistura 1 e o pior resultado foi obtido com a mistura 4. As misturas 1 e 4 possuem o menor e o maior diâmetro mediano D_{50} , respectivamente, entre as misturas utilizadas neste canal tendo *ripples* como forma do leito.

Para dunas como regime de resistência através da análise gráfica, verificou-se uma dispersão maior entre os valores dos parâmetros de resistência B , onde o pior resultado foi obtido através da mistura 1 e o melhor resultado foi obtido através da mistura 3.

No caso do leito plano como forma do leito, apenas as misturas 1, 3 e 9 apresentaram a possibilidade de utilização da técnica de regressão para a obtenção das relações funcionais entre B_c e os parâmetros adimensionais $u_*b/(gv)^{1/3}$ e F_r . Os resultados indicam uma grande variação dos coeficientes de regressão apesar dos altos valores dos coeficientes de determinação R^2 para este regime de resistência. A análise gráfica também indicou uma maior dispersão dos valores dos parâmetros de resistência calculados pelas equações (3.10) e (3.18), no caso do leito plano como forma do leito.

O segundo canal de recirculação, utilizado por Guy *et al.* (1966) com 0,61 m de largura, apresentou uma quantidade menor de dados, cuja metodologia proposta agora pudesse ser utilizada. Para *ripples* apenas uma mistura, a de número 7, possuía dados suficientes para que a técnica de regressão fosse utilizada. Os valores dos coeficientes das equações de regressão para o parâmetro de resistência B_c em função de três ou dois parâmetros adimensionais, e os valores dos coeficientes de determinação R^2 estão indicados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Através das Tabelas 4.1 e 4.2, foi possível observar que para as dunas como regime de resistência, os coeficientes de regressão, para o parâmetro de resistência B_c variaram muito, principalmente para as equações obtidas com os dados das misturas 6 e 8. A análise gráfica indica uma maior dispersão entre os valores dos parâmetros de resistência B para as misturas 7 e 8. As Figuras 4.40 e 4.41 mostram os resultados obtidos através das misturas 7 e 8, respectivamente, com B_c calculado em função de três parâmetros adimensionais.

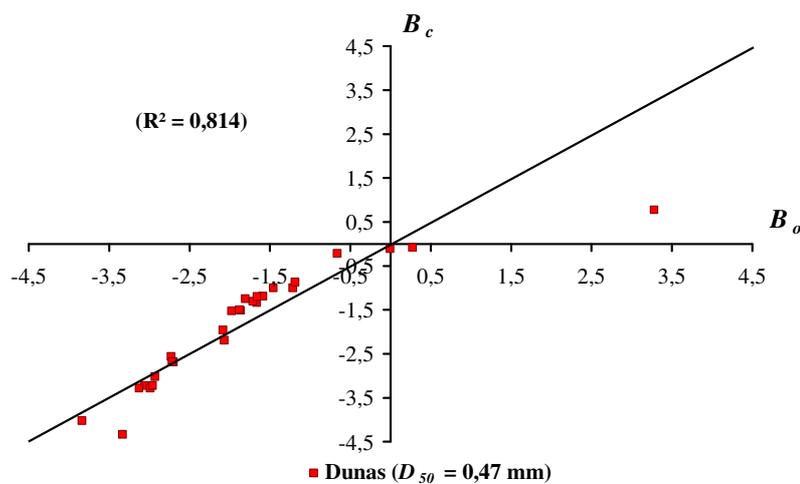


Figura 4.40 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 7 com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

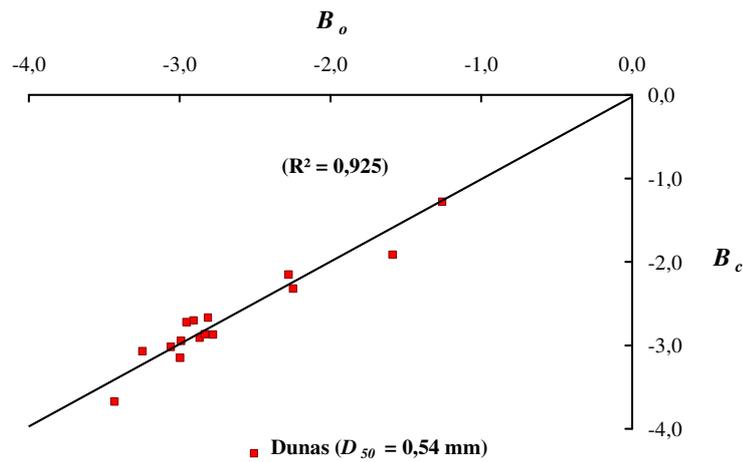


Figura 4.41 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 8 com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

Apenas uma mistura, também a de número 7, apresentou dados suficientes para a determinação da equação do parâmetro de resistência B_c em função dos parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$ utilizando a técnica de regressão, tendo o leito plano como regime de resistência.

Para *ripples* como forma do leito, a mistura 7 continuou sendo a única que possuía dados suficientes para que a técnica de regressão fosse utilizada quando as expressões do parâmetro de resistência B_c foram determinadas em função dos parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$ e F_r . No caso de dunas, os valores dos coeficientes das equações de B_c em função de dois parâmetros adimensionais apresentaram grande variação para as misturas 6 e 7, justamente as misturas que apresentam a menor e maior dispersão entre os valores de B_o e B_c através da análise gráfica. As Figuras 4.42 e 4.43 mostram os resultados para estas duas misturas.

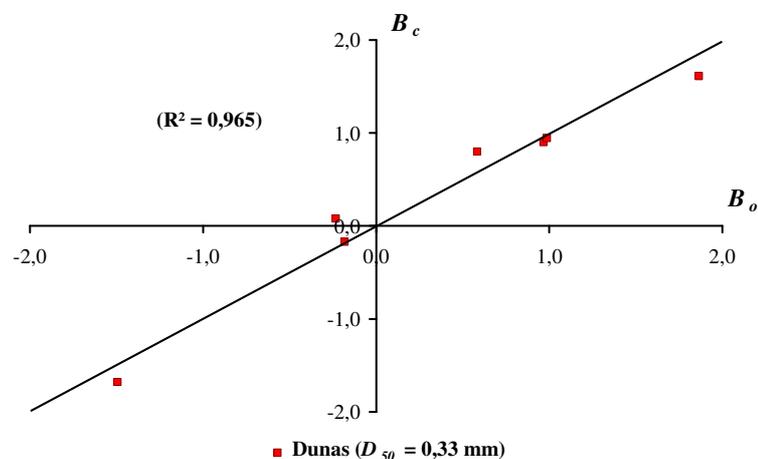


Figura 4.42 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - Mistura 6 com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

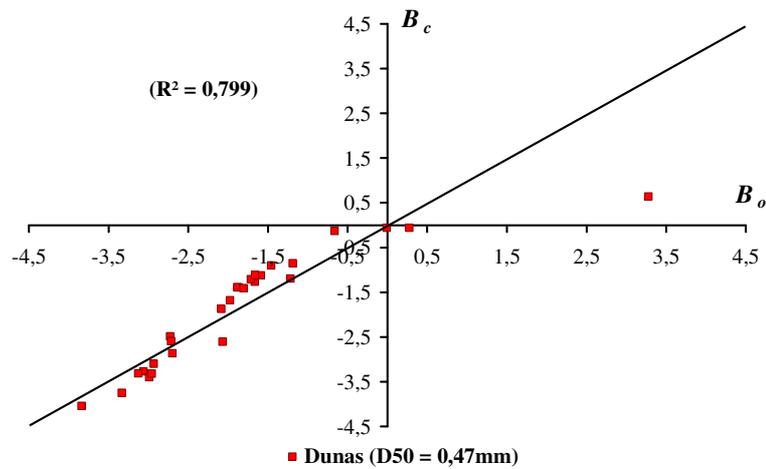


Figura 4.43 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas - mistura 7 com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

Para o leito plano como regime de resistência, a variação dos coeficientes das equações obtidas para o parâmetro de resistência B_c em função de dois parâmetros adimensionais é considerável mesmo verificando que os coeficientes de determinação R^2 entre B_o e B_c apresentaram valores próximos da unidade. As misturas 7 e 8 proporcionaram as maiores variações nos coeficientes das equações obtidas para o parâmetro B_c através da técnica de regressão, bem como os maiores e menores valores dos coeficientes de determinação R^2 entre os parâmetros de resistência B , respectivamente.

As Figuras 4.44 e 4.45 mostram os resultados obtidos através das misturas 7 e 8 para o leito plano como forma do leito.

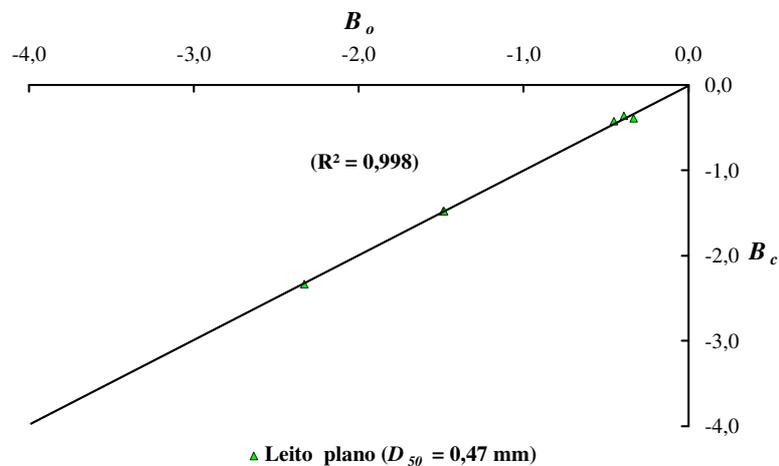


Figura 4.44 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - mistura 7 com 2 parâmetros - Guy *et al.* (1966).

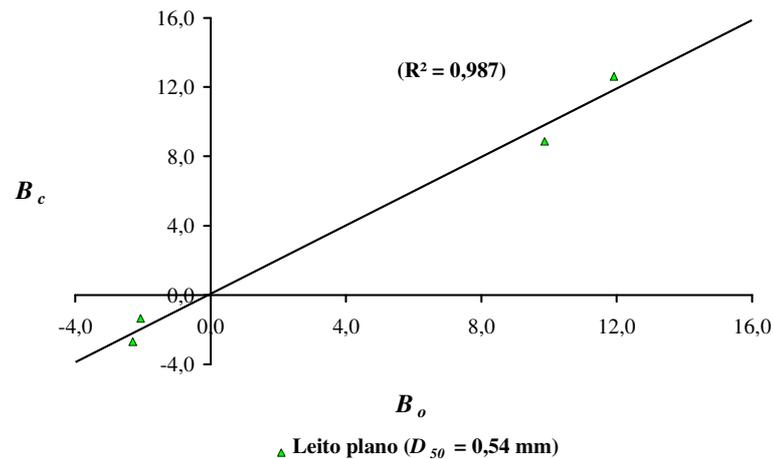


Figura 4.45 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano - mistura 8 com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

Para todas as misturas analisadas isoladamente do conjunto de Guy *et al.* (1966), pode-se observar a mesma tendência da reta de melhor ajuste associada a cada forma do leito, o que é um forte indicativo de que as misturas podem ser agrupadas e associadas não mais ao tipo de mistura mas apenas a forma do leito. Apesar de construir os gráficos para todas as misturas associadas a cada forma do leito para os dados obtidos por Guy *et al.* (1966) quando analisados sem agrupamento, foram mostrados, neste capítulo, apenas os que apresentaram uma grande variação dos valores dos coeficientes de regressão ou através da análise gráfica, onde esta variação foi indicada através da dispersão dos valores dos parâmetros de resistência B_o e B_c . Os dados foram agrupados de acordo com a fonte dos dados, a forma do leito e o tipo de canal para, a princípio, se obter uma relação funcional entre o parâmetro de resistência B e os parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$, e posteriormente obter a relação funcional entre o parâmetro de resistência B e os parâmetros adimensionais usando $u_{*b}/(gv)^{1/3}$ e F_r , com auxílio da técnica da regressão linear múltipla.

As Figuras 4.46 e 4.47 mostram os resultados para o regime de *ripples* após o agrupamento dos dados obtidos por Guy *et al.* (1966) nos dois sistemas experimentais utilizados, onde a largura dos canais e o diâmetro mediano das misturas são diferentes.

As Figuras 4.48 e 4.49 mostram os valores dos parâmetros B_o calculados através da equação (3.10) e de B_c obtidos pelas equações (3.17) e (3.18), após o agrupamento das misturas no regime de dunas. Os resultados obtidos após o agrupamento das misturas confirmam a tendência observada para os dados utilizados sem o agrupamento, sempre associados a cada forma do leito.

As Figuras 4.50 e 4.51 indicam os resultados obtidos no regime de leito plano após o agrupamento das misturas com a relação funcional do parâmetro B e os parâmetros adimensionais.

Apesar dos coeficientes de determinação apresentarem bons resultados, fica evidente para o regime de leito plano a influência da distribuição granulométrica das misturas utilizadas, onde cada mistura apresenta-se com uma tendência diferente, indicando que cada mistura deve ser analisada separadamente para a obtenção do parâmetro de resistência B. Neste caso também são verificadas as maiores variações dos coeficientes das equações obtidas através da técnica de regressão em função de três ou dois parâmetros adimensionais, o que também é confirmado pela análise gráfica.

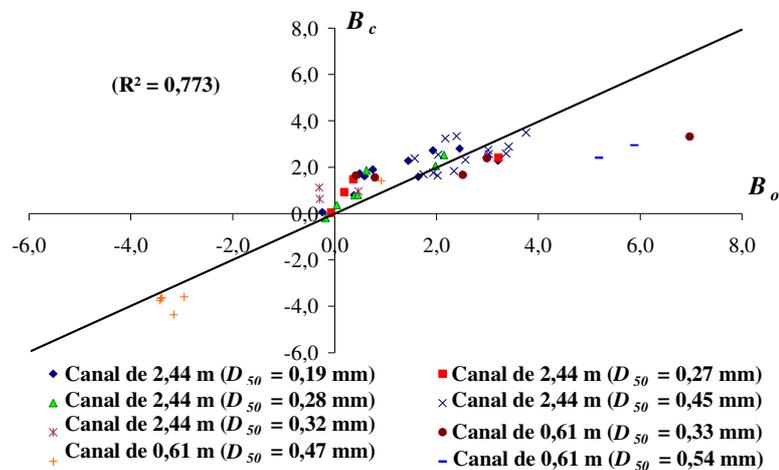


Figura 4.46 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para ripples com dados agrupados com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

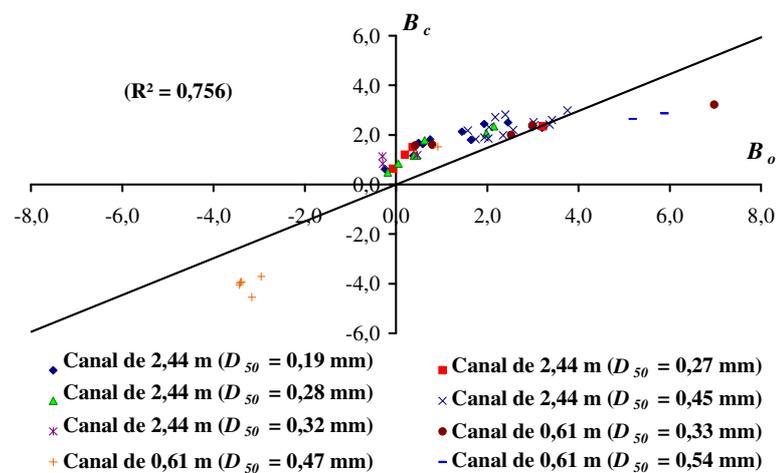


Figura 4.47 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para ripples com dados agrupados com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

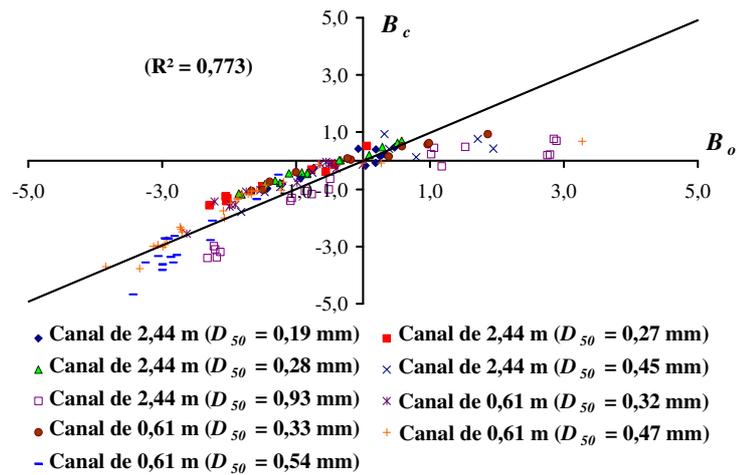


Figura 4.48 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

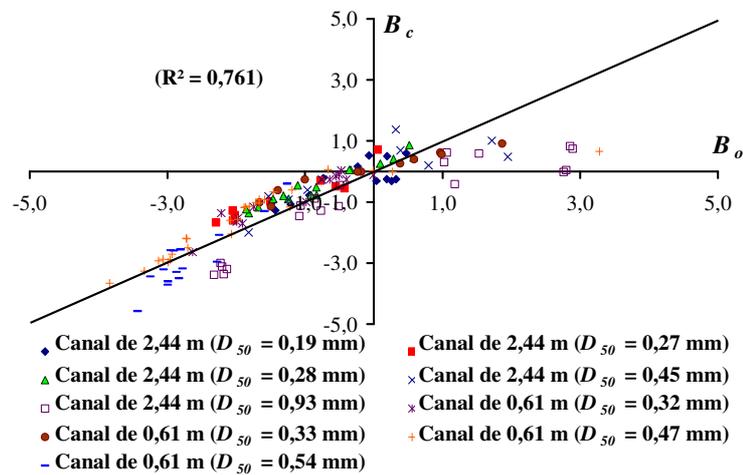


Figura 4.49 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

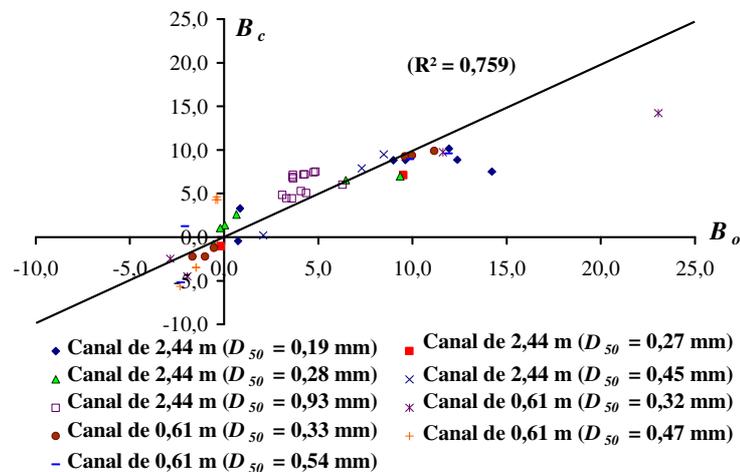


Figura 4.50 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com três parâmetros - Guy *et al.* (1966).

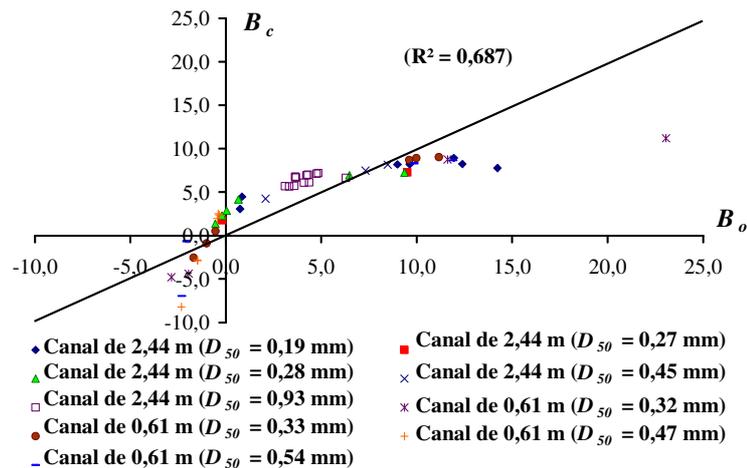


Figura 4.51 - Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com dois parâmetros - Guy *et al.* (1966).

4.2.3 – Resultados obtidos através dos dados coletados por Srinivasan (1969)

Poucos trabalhos na literatura trabalham apenas com o leito plano como forma do leito para a avaliação da resistência em canais aluviais. Srinivasan (1969) analisou as condições de instabilidade do leito plano para a classificação das formas do leito através de medições rigorosas em um canal de laboratório, determinando diversas variáveis do fluxo e dos sedimentos, das quais algumas foram listadas na Tabela 3.3. Uma das três misturas utilizadas por Srinivasan (1969) foi selecionada para que a metodologia proposta neste trabalho fosse aplicada.

A Figura 4.52 mostra os valores calculados de B_o pela equação (3.10) e de B_c obtidos da relação funcional entre o parâmetro de resistência B e os três parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(g.v)^{1/3}$, além da reta de igual valor. Os resultados obtidos usando os dados de Srinivasan (1969) foram excelentes para o leito plano como forma do leito, cujo valor do coeficiente de determinação R^2 entre B_o e B_c foi igual a 0,997.

A Figura 4.53 mostra os valores calculados de B_o também calculados pela equação (3.10) e de B_c calculado pela relação funcional entre o parâmetro de resistência B e dois parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$ e F_r e a reta de igual valor. Utilizando a técnica da regressão múltipla foi possível determinar o coeficiente de determinação R^2 para essa relação sendo igual a 0,925.

A análise gráfica não indica uma redução significativa na precisão dos resultados do parâmetro de resistência B_c quando calculado em função de dois parâmetros adimensionais.

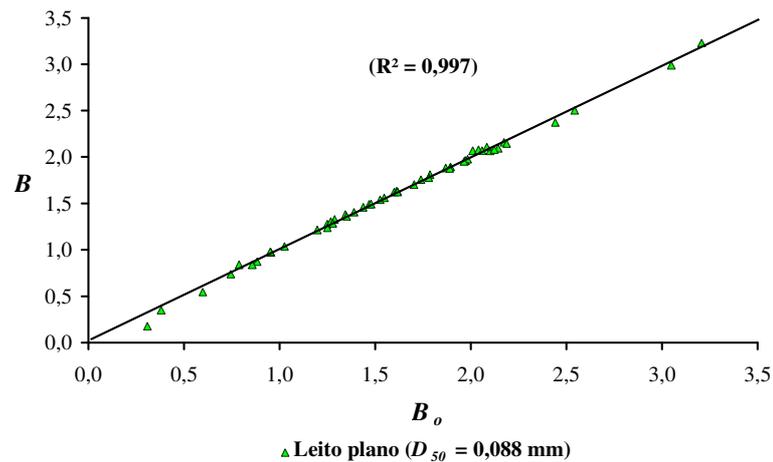


Figura 4.52 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano com três parâmetros - Srinivasan (1969).

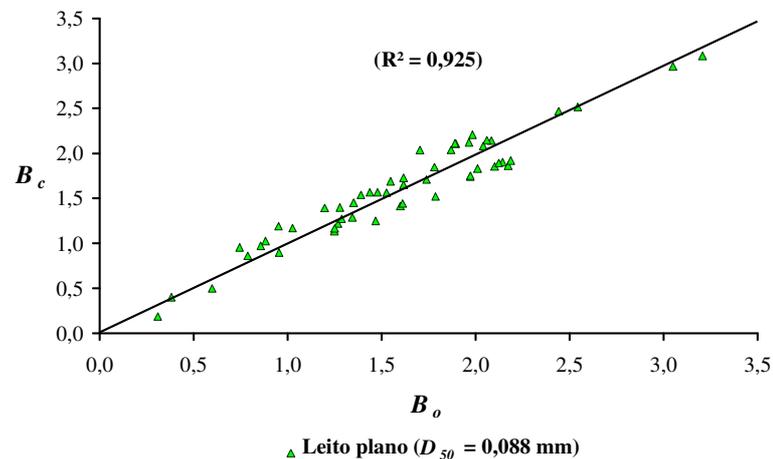


Figura 4.53 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano com dois parâmetros - Srinivasan (1969).

4.2.4 – Resultados obtidos através dos dados coletados por Samaga *et al.* (1986)

As Figuras B.17 a B.20 no Anexo B mostram os valores calculados de B_o pela equação (3.10) e B_c obtidos da relação funcional entre o parâmetro de resistência B e os três parâmetros adimensionais $u_*b/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$. Os resultados obtidos usando os dados de Samaga *et al.* (1986) foram excelentes para dunas como forma do leito cujos coeficientes das equações de B_c obtidas através da técnica de regressão praticamente variaram em função dos seus valores médios quando comparados entre as misturas deste conjunto de dados.

Os resultados obtidos para os coeficientes de regressão e os valores dos coeficientes de determinação R^2 entre B_o calculado pela equação (3.10) e B_c calculado pela equação (3.17) estão mostrados na Tabela 4.1.

As Figuras B.21 a B.24 em anexo mostram os resultados obtidos através da relação funcional entre B_c e os parâmetros adimensionais $u_*b/(gv)^{1/3}$ e F_r , obtida através da técnica da regressão linear múltipla. A Tabela 4.2 indica os valores dos coeficientes de regressão e os valores dos coeficientes de determinação R^2 para cada mistura analisada.

Para todas as misturas utilizadas por Samaga *et al.* (1986), quando analisadas isoladamente, pode-se observar uma tendência semelhante da equação do melhor ajuste entre B_o e B_c , evidenciando a possibilidade de agrupamento das misturas. Os dados foram agrupados e uma relação funcional para a determinação da resistência associada não mais ao tipo de mistura mas apenas à forma do leito foi obtida.

As Figuras B.40 e B.41 no Anexo B mostram os resultados após o agrupamento dos dados obtidos por Samaga *et al.* (1986) para o regime de dunas entre B_o calculado pela equação (3.10) e B_c calculado pelas equações (3.17) e (3.18), usando três e dois parâmetros adimensionais, respectivamente, como variáveis independentes.

Os resultados após o agrupamento também confirmam a tendência obtida pelas relações funcionais do parâmetro de resistência B quando as misturas foram analisadas isoladamente, onde os valores dos coeficientes das equações de B_c obtidas, possuem praticamente o valor médio dos coeficientes das relações individuais, indicando assim que as relações funcionais após o agrupamento, neste caso, podem representar o valor do parâmetro de resistência B associado apenas à forma do leito e não mais ao tipo de mistura.

Apesar da pequena quantidade de dados obtidos por Samaga *et al.* (1986), os resultados mostram a influência das dunas como forma do leito para a definição de uma função de resistência ficando evidente que este tipo de forma do leito oculta a influência da distribuição granulométrica das misturas, tornando, neste caso, a função de resistência dependente apenas da forma do leito.

4.2.5 – Resultados obtidos através dos dados coletados por Cavalcante (1992)

As Figuras B.25 a B.33 mostram os valores de B_o calculados pela equação (3.10) e B_c calculados através das equações (3.17) e (3.18) com auxílio da técnica de regressão em função de três e dois parâmetros adimensionais, respectivamente, associado a cada forma do leito. Apenas a mistura 1 apresentou dados com a formação de *ripples* como regime de resistência. Para dunas e leito plano como regime de resistência, observa-se uma pequena variação dos coeficientes das equações do parâmetro de resistência B_c obtidas através da técnica de

regressão múltipla. Os valores dos coeficientes regressão e os coeficientes de determinação R^2 sempre associados a cada forma do leito, estão indicados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Os dados foram agrupados e as relações funcionais unificadas foram obtidas onde as Figuras B.42 a B.45, em anexo, mostram os valores de B_o e B_c e os coeficientes de determinação R^2 . A análise gráfica indica uma pequena dispersão entre os valores dos parâmetros de resistência B no caso de dunas como forma do leito.

Para o leito plano como regime de resistência, os dados agrupados mostram que as distribuições granulométricas das misturas influenciam as funções de resistência e as relações funcionais isoladas, neste caso, também representariam de forma mais adequada a resistência oferecida por cada mistura.

4.2.6 – Resultados obtidos através dos dados coletados por Julien & Raslan (1998)

Julien & Raslan (1998) usaram três misturas unimodais com diferentes diâmetros medianos, onde a distribuição granulométrica das misturas não foi mostrada pelos pesquisadores, tendo o leito plano como forma do leito.

As Figuras B.34 a B.36, em anexo, mostram os valores de B_o calculados pela equação (3.10) e B_c calculados pela equação (3.17). As Figuras B.37 a B.39, em anexo, indicam os valores de B_o também calculado pela equação (3.10) e de B_c calculados pela equação (3.18) associados a cada forma do leito. Quando as equações do parâmetro de resistência B_c foram obtidas em função de três parâmetros adimensionais houve uma pequena variação dos coeficientes de regressão indicados na Tabela 4.1 quando comparados com as misturas deste conjunto de dados. Para as relações de B_c em função de dois parâmetros adimensionais os coeficientes de regressão apresentaram uma maior variação para a mistura 1, a que possui o menor diâmetro mediano, $D_{50} = 0,20$ mm, das misturas utilizadas.

Não houve uma redução significativa na precisão dos resultados para a previsão da resistência através do parâmetro de resistência B quando a relação funcional foi obtida em função de dois parâmetros adimensionais, o que indica que neste caso os parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$ e F_r são relevantes no processo.

4.2.7 – Resultados obtidos através dos dados coletados por Medeiros (1999)

Apenas um único conjunto de dados com misturas bimodais foi utilizado neste trabalho. Medeiros (1999) realizou uma investigação sobre o transporte de sedimentos com

misturas bimodais em um canal de laboratório utilizando três misturas que possuíam diferentes diâmetros medianos.

As Figuras 4.54 a 4.56 mostram os valores de B_o e B_c e a variação do fator de resistência B com dunas como forma do leito para as misturas 1, 2 e 3, respectivamente. Os resultados foram excelentes quando as misturas foram analisadas isoladamente no caso de dunas, para as três misturas, indicando a excelente relação funcional entre o fator B_o calculado pela equação (3.10) e B_c calculado através dos parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$, usando a técnica de regressão linear múltipla, o que nos permite fazer a previsão da resistência do canal associada a este tipo de forma do leito.

As Figuras 4.57 a 4.59 mostram os valores de B_o e B_c , e a variação da relação funcional entre o parâmetro de resistência B e os parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$ e F_r , com dunas como forma do leito, para as misturas 1, 2 e 3, respectivamente. Não houve uma redução significativa na precisão da relação funcional entre o fator B_o calculado pela equação (3.10) e B_c calculado pela equação (3.18). A tendência indica uma variação linear para as misturas analisadas com dunas como forma do leito. Para dunas como forma do leito, os coeficientes de regressão obtidos em função de dois parâmetros adimensionais apresentaram uma variação maior do que os coeficientes das equações de regressão do parâmetro B_c , obtidos em função de três parâmetros adimensionais.

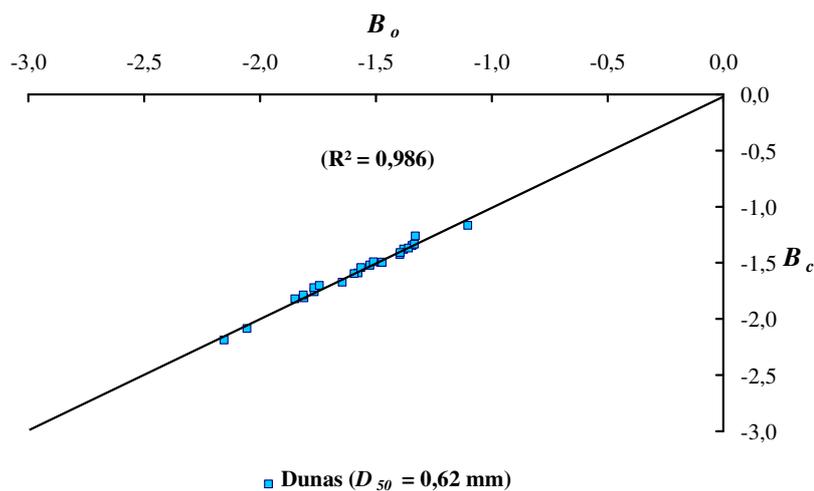


Figura 4.54 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 1 com três parâmetros - Medeiros (1999).

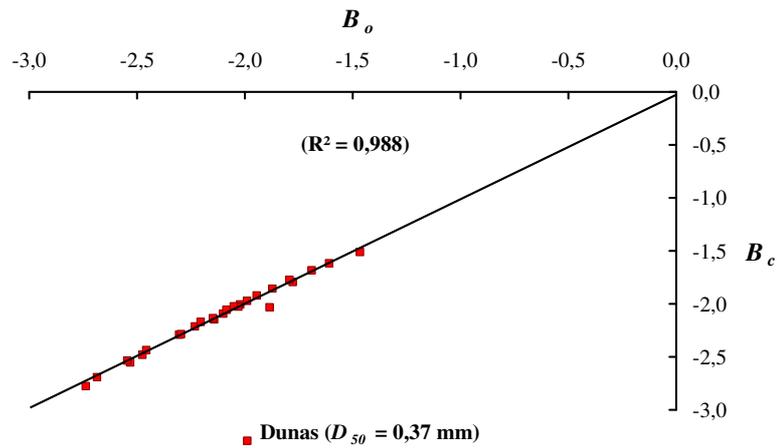


Figura 4.55 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 2 com três parâmetros - Medeiros (1999).

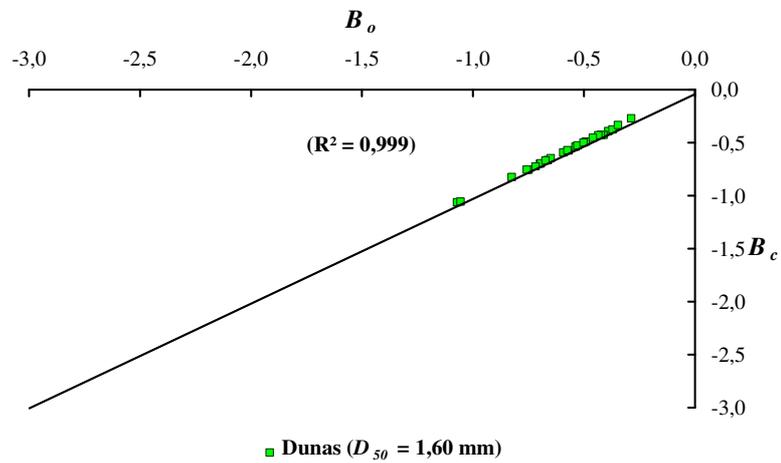


Figura 4.56 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 3 com três parâmetros - Medeiros (1999).

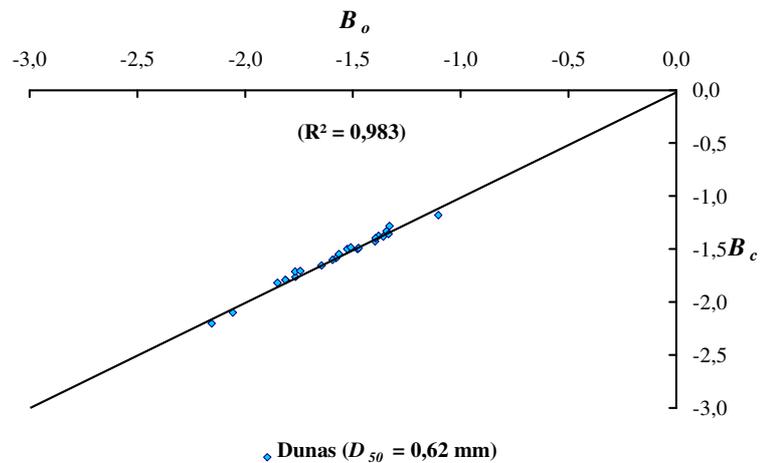


Figura 4.57 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 1 com dois parâmetros - Medeiros (1999).

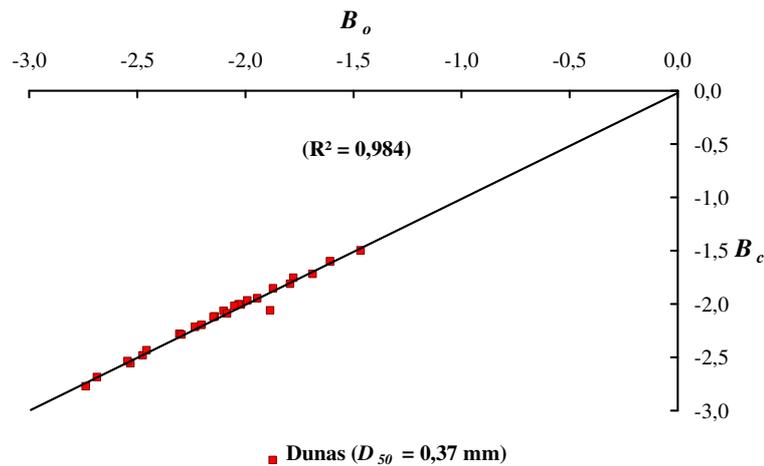


Figura 4.58 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 2 com dois parâmetros - Medeiros (1999).

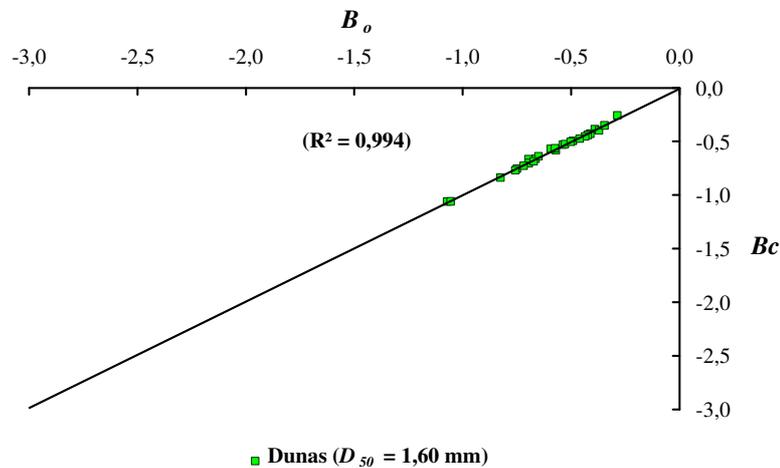


Figura 4.59 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para dunas - Mistura 3 com dois parâmetros - Medeiros (1999).

No regime de leito plano, apenas as misturas 2 e 3 apresentaram dados para serem analisados. As Figuras 4.60 e 4.61 mostram os valores de B_o calculados através da equação (3.10) e de B_c em função dos parâmetros adimensionais $u_{*b}/(g\nu)^{1/3}$, Fr e $V/(g\nu)^{1/3}$. As Figuras 4.62 e 4.63 representam os valores de B_o calculados através da equação (3.10) e de B_c calculados através dos parâmetros adimensionais $u_{*b}/(g\nu)^{1/3}$ e Fr para o leito plano como forma do leito.

As Figuras 4.64 e 4.65 mostram os valores de B_o e B_c após o agrupamento dos dados para leito plano como regime de resistência. Os coeficientes de determinação R^2 para as misturas agrupadas mostram uma redução significativa em relação aos valores obtidos sem o agrupamento, sendo igual a 0,496, quando o parâmetro de resistência B foi obtido em função de dois parâmetros adimensionais.

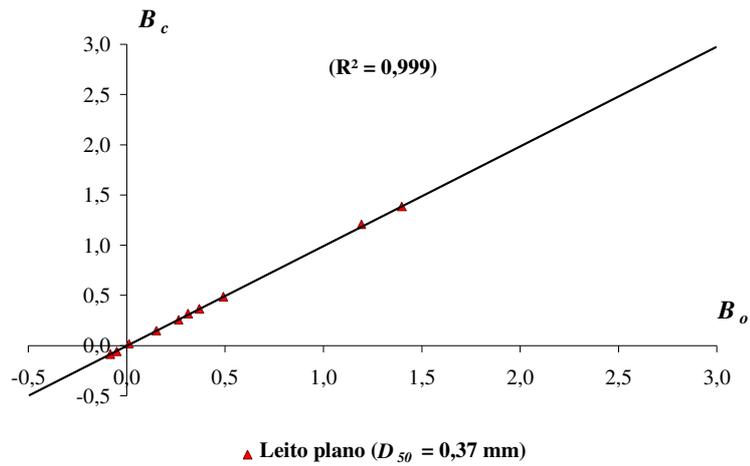


Figura 4.60 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano - Mistura 2 com três parâmetros - Medeiros (1999).

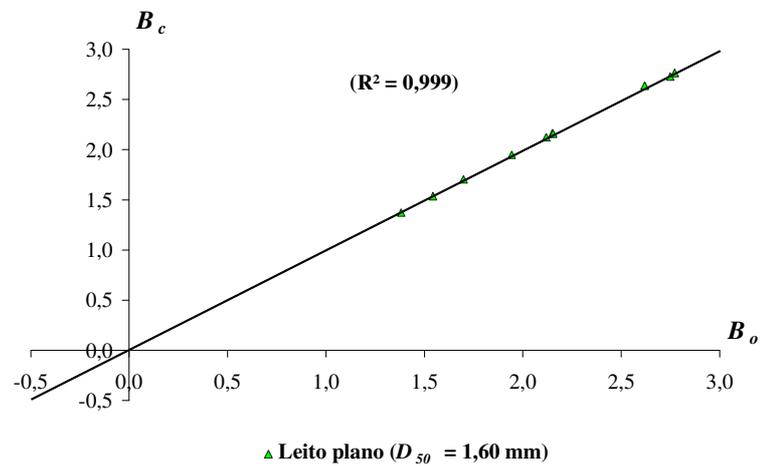


Figura 4.61 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano - Mistura 3 com três parâmetros - Medeiros (1999).

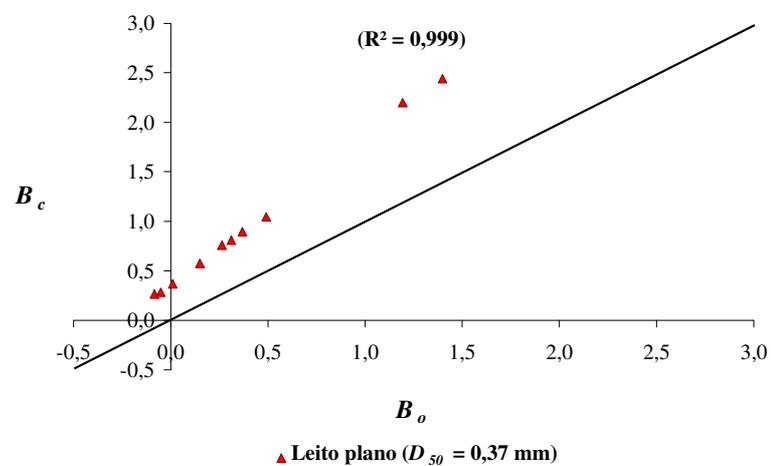


Figura 4.62 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano - Mistura 2 com dois parâmetros - Medeiros (1999).

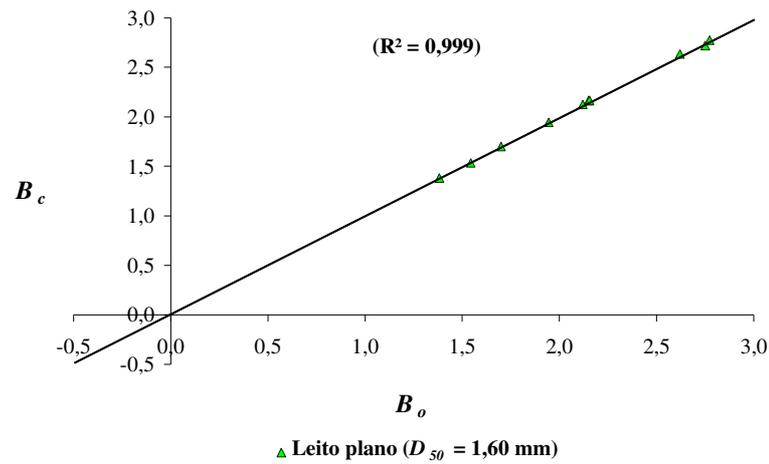


Figura 4.63 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para leito plano - Mistura 3 com dois parâmetros - Medeiros (1999).

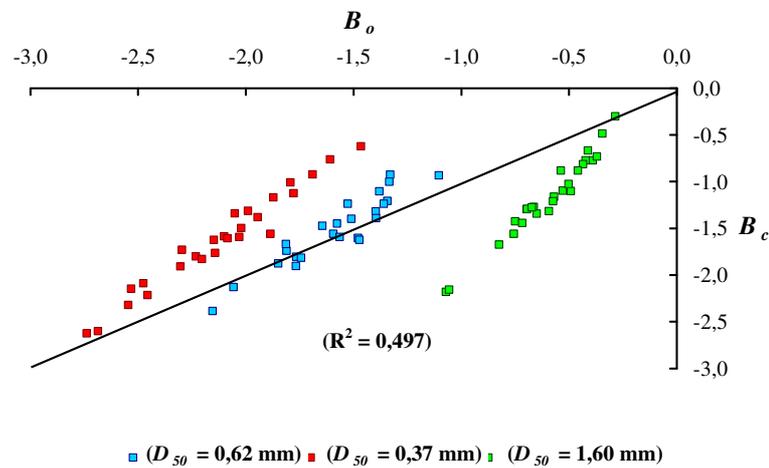


Figura 4.64 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c após o agrupamento para dunas com três parâmetros - Medeiros (1999).

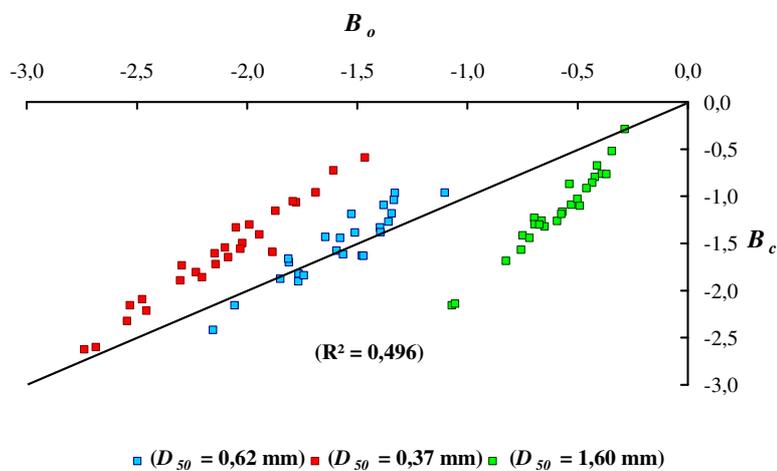


Figura 4.65 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c após o agrupamento para dunas com dois parâmetros - Medeiros (1999).

As Figuras 4.66 e 4.67 mostram os valores de B_o e B_c calculados através do mesmo procedimento descrito para o caso de dunas, sendo utilizados os dados agrupados referente ao leito plano como forma do leito. Os coeficientes de determinação R^2 entre B_o e B_c para as misturas agrupadas para leito plano como forma do leito mostram uma redução significativa em relação aos valores obtidos sem o agrupamento. Para a relação funcional do parâmetro de resistência B em função de três parâmetros adimensionais, o valor do coeficiente de determinação R^2 é igual a 0,648 e em função de dois parâmetros adimensionais, a relação funcional entre B_o e B_c , apresenta o valor do coeficiente de determinação R^2 sendo igual a 0,614.

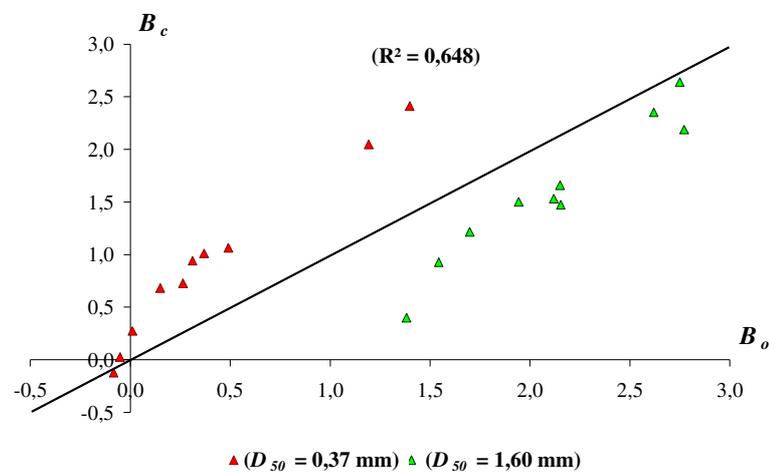


Figura 4.66 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c após o agrupamento para leito plano com três parâmetros - Medeiros (1999).

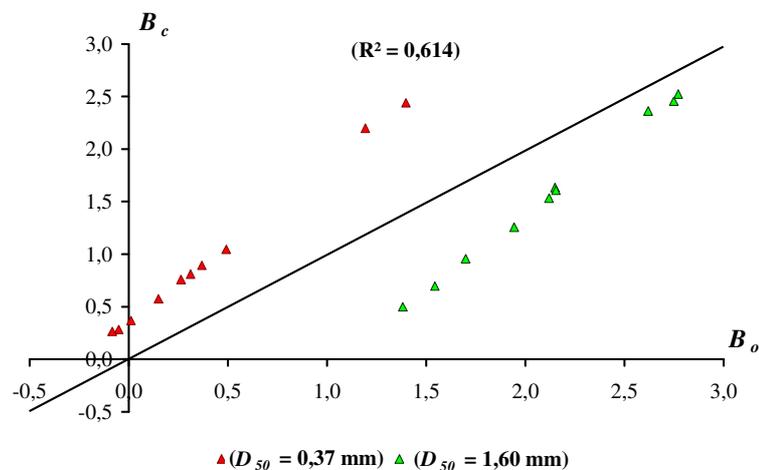


Figura 4.67 - Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c após o agrupamento para leito plano com dois parâmetros - Medeiros (1999).

A Tabela 4.1 permitiu identificar uma variação maior dos coeficientes de regressão em função de três parâmetros adimensionais para o leito plano como regime de resistência. A Tabela 4.2 também mostra a variação dos coeficientes de regressão quando o parâmetro de resistência B foi calculado através da equação (3.18), principalmente no leito plano como regime de resistência. Para dunas, os coeficientes das equações indicados nas Tabelas 4.1 e 4.2 mostram uma pequena variação entre as misturas desse conjunto de dados.

As Figuras 4.64 a 4.67 indicam o agrupamento das misturas para leito plano como forma do leito com misturas bimodais, onde o ajuste obtido através das relações funcionais não confirma a mesma tendência observada para as relações obtidas isoladamente. Fica evidente que maiores estudos são necessários para este regime, principalmente no que diz respeito à influência dos sedimentos em suspensão sobre a distribuição de velocidade. Para misturas bimodais usando o leito plano como forma do leito, o número de ensaios é reduzido. Apesar disto, as retas de tendência, mostradas graficamente, indicam a influência da bimodalidade sobre as funções de resistência e da distribuição granulométrica de cada mistura analisada.

As relações de resistência obtidas isoladamente através do parâmetro de resistência B associado a cada forma do leito apresentam excelentes resultados, porém quando se tenta obter um valor através dos dados agrupados, os valores dos coeficientes de regressão variam muito em relação aos seus valores individuais indicando que a relação funcional obtida após o agrupamento não pode ser utilizada para as misturas bimodais, tanto para dunas como para leito plano como regime de resistência.

Pôde-se observar um acréscimo no valor do parâmetro B para o caso de leito plano em comparação com o regime de dunas. Isto é explicado pelo fato que nas misturas com dunas a profundidade de fluxo, para a mesma vazão, será maior do que nos casos com leito plano, fazendo com que o parâmetro B seja reduzido, visto que de acordo com a relação obtida do fator B da equação de resistência, a profundidade afeta inversamente o parâmetro B. As relações gráficas obtidas entre o fator de resistência B_o calculado através da equação (3.10) e o fator de resistência B_c obtido através dos parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$ nos permite, portanto, fazer uma previsão de resistência nos canais aluviais quando a forma do leito é conhecida.

A análise de regressão múltipla mostrou que o parâmetro $V/(gv)^{1/3}$ era o menos sensível entre todos os outros e, desta forma, definiu-se a relação funcional da resistência na forma geral da equação (3.18), relacionando o parâmetro de resistência B aos parâmetros

adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$ e F_r , o que também mostra a relevância destes parâmetros no processo.

A natureza da variação de B implica que a resistência adicional das formas do leito como obstáculo ao fluxo varia com as condições hidráulicas de escoamento. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se uma diminuição na inclinação das retas lineares de ajustes para as misturas mais grossas com dunas. A mistura mais fina foi a que apresentou a maior taxa de redução do parâmetro B e a mais grossa com a menor taxa. Assim, há uma forte indicação que a bimodalidade afeta significativamente a natureza da variação da resistência do leito.

4.2.8 – Resultados obtidos através dos dados coletados por Karim (1995, 1999)

Karim (1995, 1999) trabalhou com dados de laboratório e de campo, porém neste trabalho foram usados apenas os dados de campo, pois os dados de canais de laboratório coincidem com os dados apresentados por Guy *et al.* (1966).

As Figuras 4.68 a 4.75 mostram os valores calculados de B_o pela equação (3.10), de B_c calculados pelas equações (3.17) e (3.18), e os coeficientes de determinação entre B_o e B_c para cada rio analisado. A análise gráfica permite identificar uma grande variação para os valores dos parâmetros de resistência B para cada rio analisado.

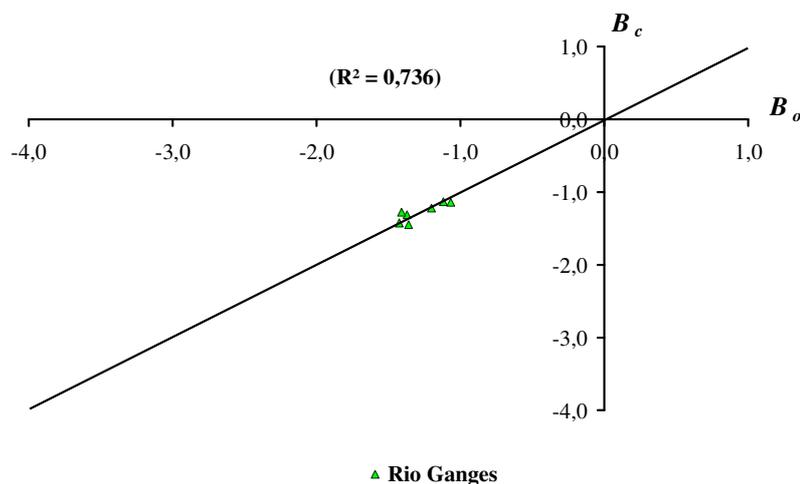


Figura 4.68 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Ganges com três parâmetros adimensionais.

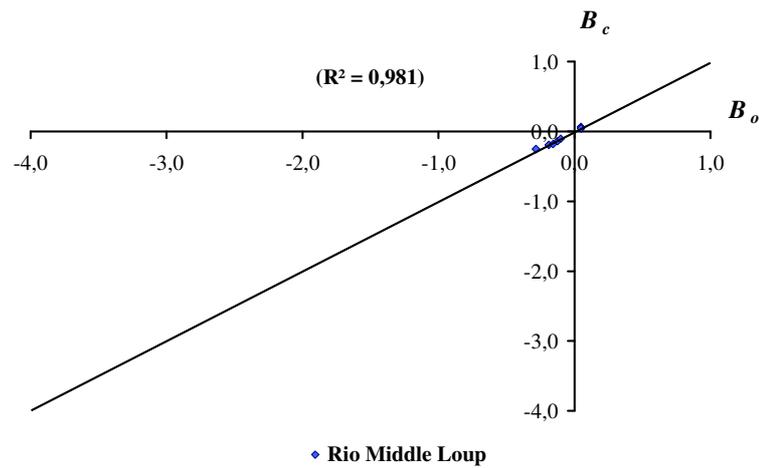


Figura 4.69 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Middle Loup com três parâmetros adimensionais.

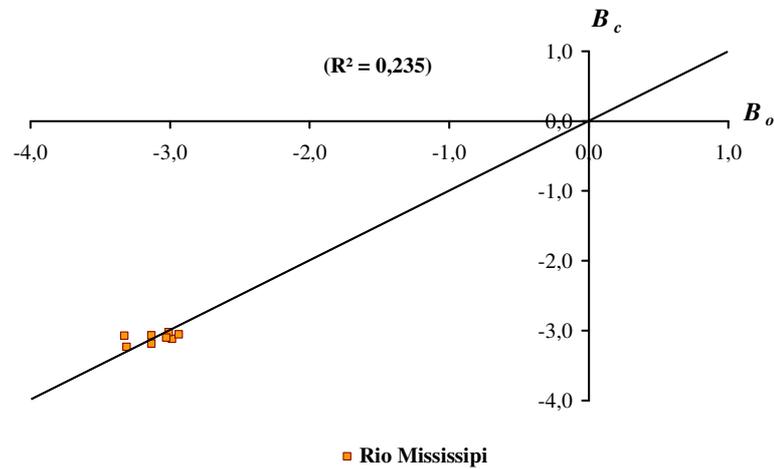


Figura 4.70 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Mississippi com três parâmetros adimensionais.

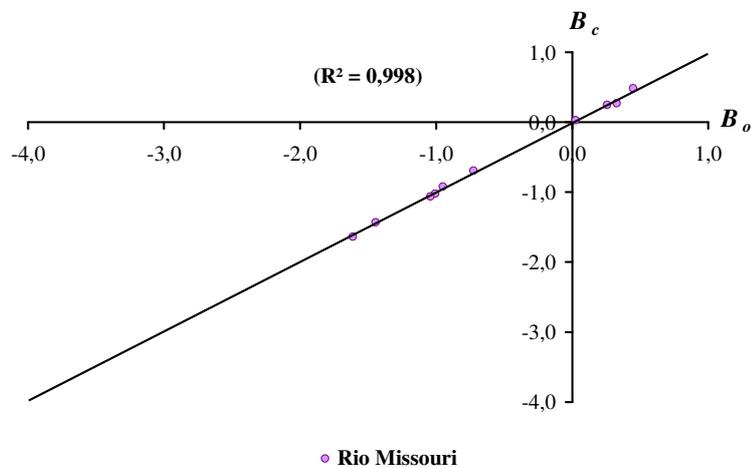


Figura 4.71 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Missouri com três parâmetros adimensionais.

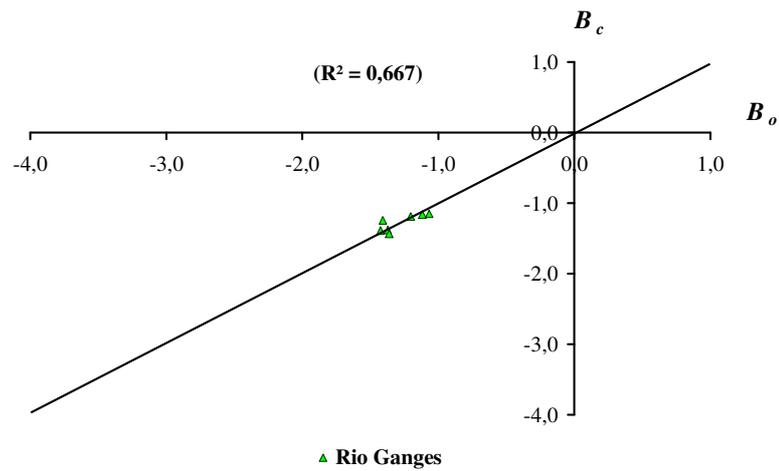


Figura 4.72 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Ganges com dois parâmetros adimensionais.

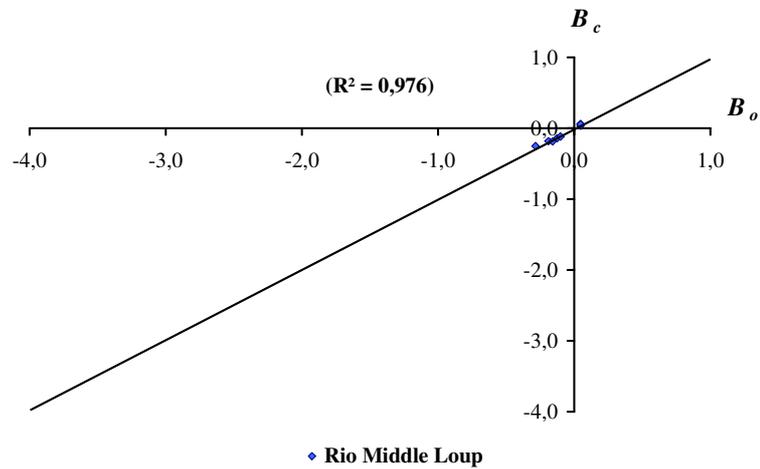


Figura 4.73 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Middle Loup com dois parâmetros adimensionais.

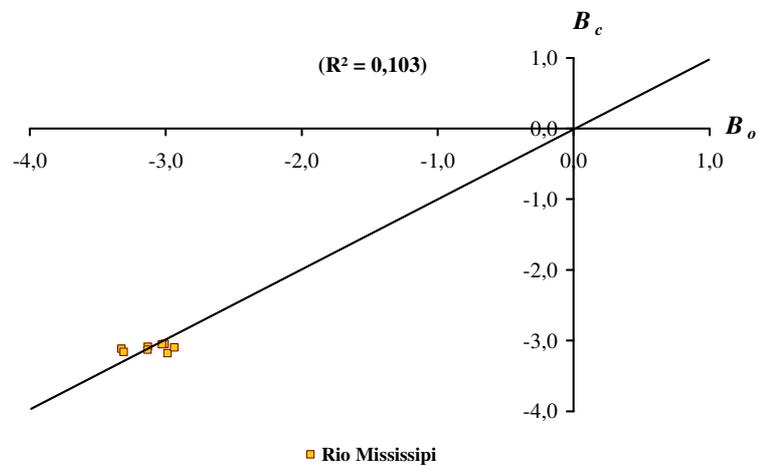


Figura 4.74 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Mississippi com dois parâmetros adimensionais.

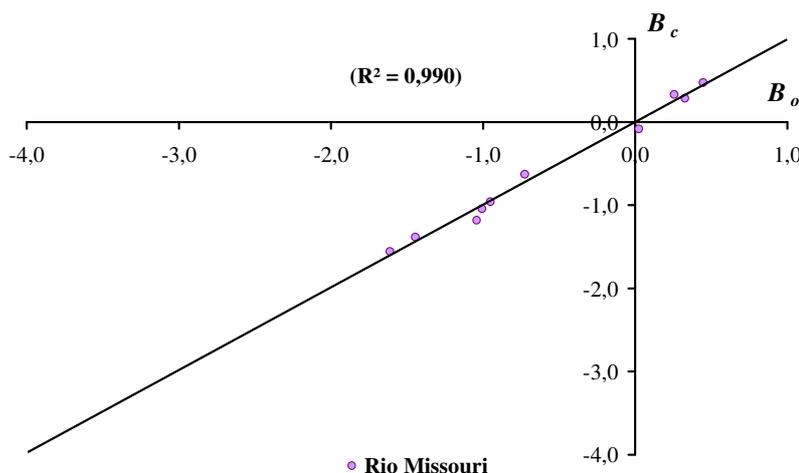


Figura 4.75 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c com dados do rio Mississippi com dois parâmetros adimensionais.

Para os rios Ganges, Middle Loup e Missouri as relações obtidas entre os valores de B_o calculado pela equação (3.10) e de B_c calculado pelas equações (3.17) e (3.18) apresentam ótimos resultados, onde os coeficientes de determinação R^2 variaram entre 0,667 e 0,998. Foi possível observar, através da análise gráfica e dos valores dos coeficientes de regressão para as relações funcionais obtidas em função de três parâmetros, uma grande variação dos valores do parâmetro de resistência B . As maiores variações são observadas nos coeficientes de regressão B e D para as equações obtidas em função de três parâmetros. Para as relações funcionais obtidas com dois parâmetros adimensionais, observa-se uma maior variação nos coeficientes de regressão, principalmente com os dados dos rios Ganges e Mississippi.

Com os dados do rio Mississippi, uma grande dispersão dos dados é observada através dos coeficientes de regressão das relações funcionais entre B_o calculado pela equação (3.10) e B_c obtido em função de três ou dois parâmetros adimensionais. A análise gráfica e os coeficientes de determinação R^2 , iguais a 0,235 e 0,103, entre B_o e B_c , confirmam esta dispersão observada através dos coeficientes de regressão.

Os dados obtidos em rios foram agrupados e uma relação funcional para a determinação da resistência associada apenas à forma do leito foi obtida. Apesar da análise sem o agrupamento dos dados apresentar uma baixa correlação entre B_o e B_c no caso do rio Mississippi, e uma grande dispersão dos coeficientes de regressão, quando os dados foram agrupados, foi possível observar que o conjunto de pontos do rio Mississippi pertence à mesma reta de tendência de todos os dados cujos coeficientes de determinação R^2 foram iguais a 0,980 e 0,932.

As Figuras 4.76 e 4.77 mostram os valores dos parâmetros B_o e B_c e os coeficientes de determinação R^2 após o agrupamento dos dados de todos os rios.

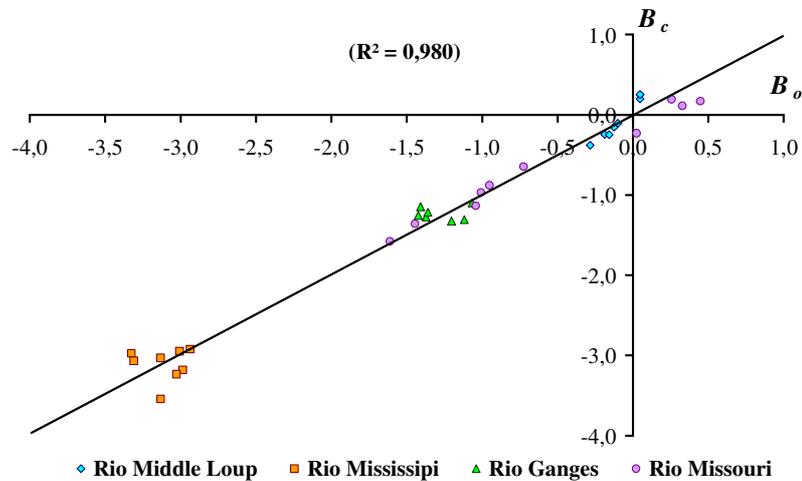


Figura 4.76 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para todos os rios com três parâmetros adimensionais.

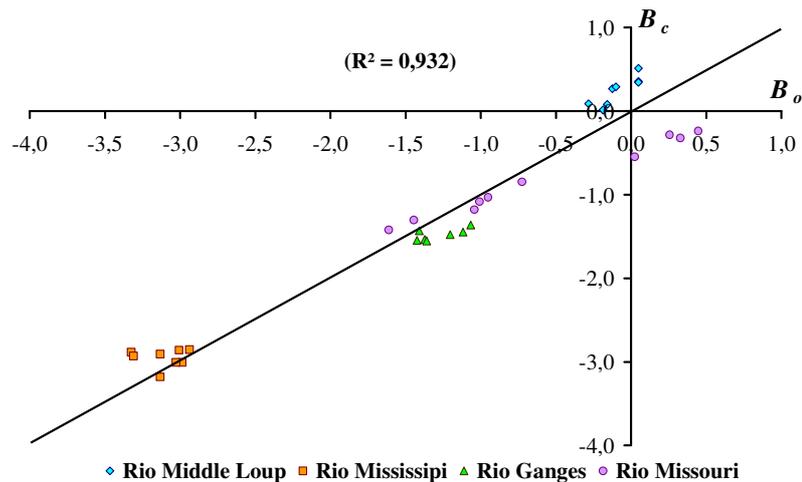


Figura 4.77 – Gráfico comparativo entre os valores de B_o e B_c para todos os rios com dois parâmetros adimensionais.

Os resultados obtidos após o agrupamento dos dados indicam o ajuste entre os dados do rio Mississippi e dos demais rios. A relação funcional obtida entre o parâmetro de resistência B_c e os parâmetros adimensionais $u_*b/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$ apresentam resultados excelentes onde o coeficiente de determinação para o regime de dunas foi igual a 0,980. Os coeficientes de regressão, obtidos após o agrupamento dos dados, tem praticamente o valor médio dos valores dos coeficientes obtidos para as relações individuais ou sem agrupamento.

Não se verificam perdas significativas de precisão quando o parâmetro de resistência B_c foi obtido através dos parâmetros $u_{*b}/(gv)^{1/3}$ e F_r .

O agrupamento dos dados mostra que apesar da grande dispersão dos pontos apresentados pelos dados do rio Mississippi, quando analisados isoladamente, não os exclui da tendência da relação funcional obtida após o agrupamento.

4.2.9 – Resultados obtidos após o agrupamento dos dados de todos os canais de laboratório

Os dados de todos os canais de laboratório também foram agrupados e associados apenas as formas do leito. As Figuras B.46 a B.51, em anexo, mostram os valores de B_o obtidos pela equação (3.10) e B_c calculados pelas expressões (3.17) e (3.18) para *ripples*, dunas e leito plano. No regime de *ripples*, a análise gráfica e os valores dos coeficientes de determinação R^2 indicam uma boa relação funcional do parâmetro de resistência B e os três e dois parâmetros adimensionais utilizados. Para dunas, os resultados também mostram uma boa relação entre B_o e B_c , apesar da maior variação dos valores dos parâmetros de resistência B, confirmado através da análise gráfica e dos valores dos coeficientes de determinação R^2 entre B_o e B_c , sendo iguais a 0,753 e 0,668, quando B_c foi obtido em função de três e dois parâmetros adimensionais, respectivamente.

No caso do leito plano como regime de resistência, foi possível observar a influência da distribuição granulométrica das misturas utilizadas, pois as alterações da forma do leito não estão presentes como no caso de *ripples* e dunas. Verifica-se graficamente que a maior parte dos pontos, obtidos através do cálculo do parâmetro de resistência B, não se ajusta bem à tendência da relação funcional obtida para o leito plano como regime de resistência através da técnica da regressão múltipla. Os coeficientes de determinação R^2 também confirmam a variação dos valores obtidos para os parâmetros de resistência B_o e B_c , onde os valores de R^2 foram iguais a 0,570 e 0,561 quando considerada a relação funcional do parâmetro B e os três e dois parâmetros adimensionais, respectivamente. Alguns dados desse conjunto foram excluídos na tentativa de identificar alguma série de dados que apresentasse uma maior dispersão dos valores obtidos através das funções determinadas. Os dados inicialmente foram excluídos por tipo de mistura, tendo sido realizadas diversas tentativas para a obtenção de um melhor ajuste funcional entre B_o e B_c . Foi possível verificar um melhor resultado do ajuste funcional entre os parâmetros B_o e B_c quando os dados obtidos através da segunda série de ensaios por Guy *et al.* (1966), para o leito plano como forma do leito, no canal de 0,61 m de

largura, foram excluídos. As Figuras B.52 e B.53, em anexo, mostram os valores de B_o e B_c , além das relações funcionais obtidas de B_c em função de três e dois parâmetros adimensionais. Os valores dos coeficientes de determinação são iguais a 0,694 e 0,679, respectivamente.

4.2.10 – Resultados obtidos após o agrupamento dos dados de rios e canais de laboratório

Após o agrupamento dos dados obtidos em canais de laboratório os dados de rios foram incorporados ao agrupamento associados sempre às formas do leito. Como na identificação das formas do leito para os rios verificou-se a presença de dunas para todas as medições apresentadas por Karim (1995, 1999) o agrupamento foi realizado levando em consideração os dados de canais de laboratório que também possuíam dunas como forma do leito. As Figuras 4.78 e 4.79 mostram os valores dos parâmetros B_o calculados pela equação (3.10) e B_c calculados pelas equações (3.17) e (3.18), respectivamente, com o auxílio da técnica de regressão linear múltipla para a determinação da relação funcional do parâmetro de resistência B em função de três e dois parâmetros adimensionais, respectivamente, e os valores dos coeficientes de determinação R^2 . As Tabelas 4.3 e 4.4 indicam os resultados obtidos para os coeficientes de regressão e os valores dos coeficientes de determinação R^2 entre B_o e B_c para o agrupamento de todos os dados, tendo as dunas como regime de resistência.

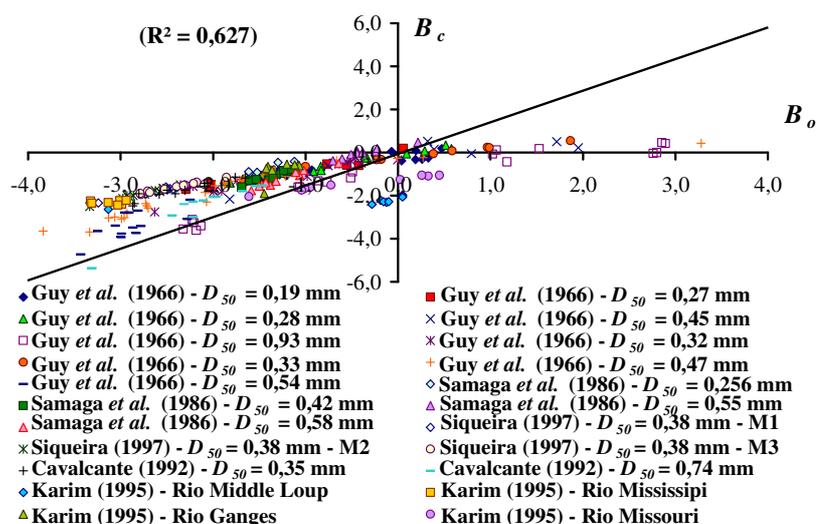


Figura 4.78 - Gráfico comparativo dos valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados - Rios e Canais de Laboratório com três parâmetros.

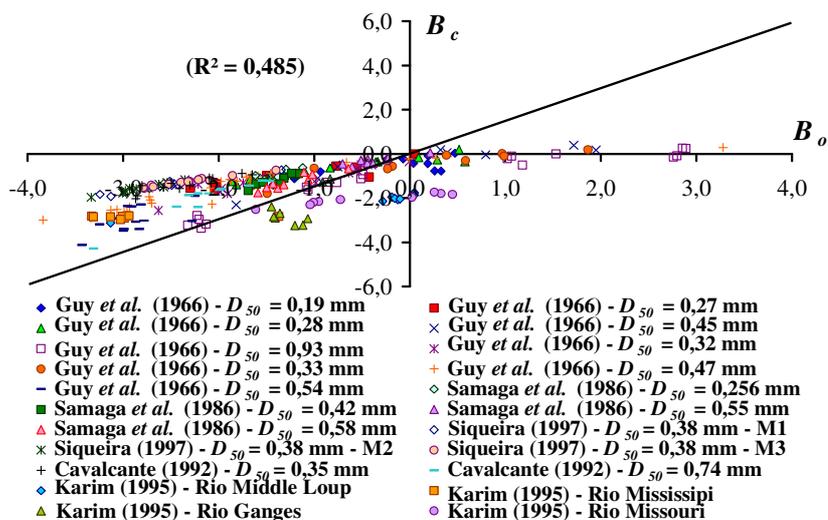


Figura 4.79 - Gráfico comparativo dos valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados - Rios e Canais de Laboratório com dois parâmetros.

4.2.11 – Resultados obtidos após o agrupamento dos dados por faixa de diâmetro mediano

Por fim, os dados foram agrupados por faixa de diâmetro mediano onde as regras de arredondamento foram utilizadas para a classificação das misturas associadas sempre a cada forma do leito. Não foi possível o agrupamento das misturas tendo *ripples* como regime de resistência, pois as faixas de diâmetros medianos D_{50} utilizados para a classificação dos experimentos não possibilitaram a formação de um conjunto mínimo de dados para que a metodologia proposta neste trabalho fosse utilizada, excetuando-se os dados já agrupados por cada fonte de dados.

Para o caso de dunas como regime de resistência, as faixas de diâmetros medianos D_{50} utilizados variaram entre 0,30 mm e 0,60 mm. Tendo o leito plano como forma do leito, as misturas foram classificadas de acordo com faixas de D_{50} , variando entre 0,20 mm e 0,50 mm.

As Figuras B.54 a B.69 mostram os valores de B_o e B_c , a reta de igual valor e os coeficientes de determinação R^2 , para dunas e leito plano como regimes de resistência.

A análise gráfica e a avaliação dos coeficientes de regressão das equações de B_c obtidas em função de três ou dois parâmetros adimensionais mostraram que os melhores resultados foram obtidos quando o leito estava recoberto por dunas. Os coeficientes de determinação indicados nas Tabelas 4.3 e 4.4 também confirmam que o padrão de

irregularidades formadas pelas dunas como forma do leito praticamente mascara a influência da distribuição granulométrica das misturas.

Para leito plano como regime de resistência, os resultados obtidos para os coeficientes de determinação R^2 entre B_o e B_c variaram entre 0,805 e 0,990. Apesar dos coeficientes de determinação indicarem um bom ajuste entre as relações funcionais para os parâmetros de resistência B_o e B_c , a análise gráfica e a variação dos coeficientes regressão obtidos através da técnica de regressão múltipla mostraram que, para o leito plano como regime de resistência, cada mistura deve possuir sua própria relação funcional para a previsão da resistência. As Figuras B.40 a B.43, em anexo, mostram os resultados de B_o obtidos pela equação (3.10) e B_c calculado em função dos parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$ para dunas como forma do leito. As Figuras B.44 a B.47, em anexo, indicam os valores de B_o e B_c calculados em função dos parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$ e F_r com dunas como regime de resistência. As Figuras B.48 a B.51 mostram os valores de B_o e B_c calculado em função de três parâmetros adimensionais para o leito plano como forma do leito. As Figuras B.52 a B.55 indicam os valores de B_o e B_c calculados em função de dois parâmetros adimensionais usando técnica de regressão linear múltipla.

4.3 – Discussão final dos resultados

Srinivasan *et al.* (2005) propuseram uma função de resistência total para o parâmetro de resistência B obtido utilizando dados oriundos de ensaios de laboratório com três misturas unimodais e três misturas bimodais. As funções foram muito bem definidas para cada mistura e forma do leito, mas, o efeito da distribuição granulométrica ficou evidenciado apenas nos casos de leito plano para sedimentos unimodais e no caso de sedimentos bimodais. As relações isoladas para o parâmetro de resistência B, obtidas por Srinivasan *et al.* (2005), para *ripples* e dunas com sedimentos unimodais indicaram que as funções de resistência total para as três misturas poderiam ser unificadas resultando numa única e boa relação funcional. Implicitamente, isto significou que a influência da distribuição granulométrica no caso de *ripples* e dunas era insignificante. Com o uso de uma massa grande de dados englobando misturas de sedimentos bastante variados e de várias fontes seria possível verificar a aplicabilidade geral ou não destes resultados. Os resultados obtidos mostram que em mais de 90% dos dados analisados o valor de R^2 foi superior a 0,90 indicando um excelente ajuste das equações de regressão.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os valores dos coeficientes de regressão e os coeficientes de determinação R^2 para cada mistura utilizando três e dois parâmetros

respectivamente. A eliminação do parâmetro $V/(gv)^{1/3}$ nas equações de regressão reduz o grau de ajuste das equações de regressão, mas, como pode ser visto na Tabela 4.2, a diferença na maioria dos casos é pequena. Desta forma, as equações de regressão com apenas dois parâmetros serviriam como boas funções de previsão. As Figuras 4.19 a 4.24 mostram as relações entre B_o e B_c para dados agrupados das três misturas de Siqueira (1997). Claramente, os dados definem uma única função e, portanto não sendo possível identificar qualquer influência diferenciada entre as três misturas, associadas sempre a cada forma do leito.

As Figuras 4.46 a 4.51 mostram as mesmas relações para dados agrupados de Guy *et al.* (1966), onde foi possível observar uma grande dispersão de dados no caso de leito plano como regime de resistência, indicando que para esta forma do leito, realmente o ajuste de relação funcional única não é a mais adequada e que cada mistura apresenta sua própria tendência. Desta forma, fica evidenciada que uma relação funcional para prever a variação do parâmetro B da resistência total com leito plano como forma do leito, pode ser definida desde que cada mistura de sedimentos seja considerada separadamente, pois, esta função é influenciada pela distribuição granulométrica de sedimentos do leito.

A possibilidade de ter uma função para B unificada para várias misturas como foi observado no caso das três misturas de Siqueira (Figuras 4.19 a 4.24) não deve ser um caso muito particular destas misturas. As misturas de Siqueira (Figura 4.19 a 4.24), apesar de possuírem distribuições granulométricas diferentes, são bastante próximas. Os tamanhos médios, além de serem iguais, quase 90% das frações estão na faixa de areia média. Desta forma, parece que a influência da distribuição granulométrica entre si é um fator muito pequeno para afetar as relações da resistência, particularmente, na variação do parâmetro B. Para verificar se esta situação ocorreria com outros dados, os dados obtidos em canais de laboratório e em rios, com misturas de tamanhos medianos variados, foram agrupados (Tabelas 4.3 e 4.4) e a equação de regressão linear múltipla ajustada para este conjunto de dados.

Como era esperado, uma função única pode ser ajustada, tendo como forma do leito as dunas, a única presente nos rios, resultando valores de R^2 iguais a 0,627 e 0,485. A relação entre B_o e B_c para estes casos são mostradas nas Figuras 4.78 e 4.79. A grande dispersão de dados indica que realmente o ajuste de relação funcional única não é a mais adequada e que cada mistura apresenta sua própria tendência.

Os resultados obtidos com misturas bimodais mostram uma forte indicação que a bimodalidade afeta significativamente a natureza da variação da resistência do leito.

Apesar da pequena quantidade de dados analisados de rios foi possível identificar após o agrupamento dos dados uma boa relação funcional única com coeficientes de determinação iguais a 0,980 e 0,932 entre B_o e B_c em função de três e dois parâmetros, respectivamente.

Estes resultados levam a crer que a influência da distribuição granulométrica não é significativa na faixa de areia fina e média de sedimentos e sua influência fica importante e bem pronunciada nas faixas de areia grossa e pedregulhos. A natureza da variação de B implica que a resistência adicional das formas do leito como obstáculo ao fluxo varia com as condições hidráulicas de escoamento que afetam as dimensões das formas do leito e uma vez estabelecidas a relação funcional para o parâmetro B para uma dada mistura de sedimentos e forma de leito, esta poderá ser utilizada tanto para fins da previsão da resistência quanto no projeto dos canais aluviais.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 – Conclusões

A partir dos estudos apresentados, foi possível estabelecer uma forma geral de uma função de resistência para canais aluviais, associada a cada forma do leito, para uma dada mistura de sedimentos. Para as misturas unimodais que possuíam a distribuição log-normal ou quase log-normal, e que estavam enquadradas na faixa de areia, não foi detectada uma influência significativa da distribuição granulométrica de sedimentos sobre a função de resistência, devido a semelhança entre as distribuições granulométricas. Com base na análise da massa de dados utilizados e nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

A análise dimensional e o processo de regressão linear múltipla permitiu estabelecer que os parâmetros adimensionais F_r e $u_{*b}/(gv)^{1/3}$ são os parâmetros mais relevantes para a estimativa do parâmetro de resistência B, explicando mais de 90% das variações na grande maioria dos casos.

Para os regimes de *ripples*, dunas e leito plano, uma relação funcional consistente e boa ($R^2 > 0,900$) pode ser observada para todas as misturas unimodais quando associada a uma única forma do leito e mistura de sedimentos. Esta relação foi obtida através do parâmetro de resistência B em função dos parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$, na forma da equação (3.17).

Uma relação funcional unificada para o parâmetro B pode ser estabelecida para as misturas unimodais com distribuições granulométricas semelhantes. Isto implica que estas misturas não apresentam diferenças significativas da resistência total devido às pequenas diferenças na distribuição granulométrica entre si.

A influência da distribuição granulométrica de sedimentos se destaca com misturas bimodais. As três misturas apresentaram relações funcionais bem distintas para cada forma do leito e a unificação da função para as três misturas não resultaram em bons resultados.

Nos casos de sedimentos unimodais com distribuição granulométrica essencialmente log-normal, a relação funcional do parâmetro B pode ser estabelecida com os parâmetros

$u_{*b}/(gv)^{1/3}$ e F_r , sem uma redução significativa na precisão dos resultados em relação aos valores obtidos em função de três parâmetros adimensionais.

Os resultados obtidos após o agrupamento dos dados obtidos por Karim (1995, 1999) indicam um bom ajuste entre os dados do rio Mississippi e dos demais rios analisados. A relação funcional obtida entre o parâmetro de resistência B e os parâmetros adimensionais $u_{*b}/(gv)^{1/3}$, F_r e $V/(gv)^{1/3}$ apresentam resultados excelentes. Não se verificam perdas significativas de precisão para a previsão do parâmetro de resistência B quando obtido através de apenas dois parâmetros, $u_{*b}/(gv)^{1/3}$ e F_r . O agrupamento dos dados mostra que apesar da grande dispersão dos valores de B apresentados pelos dados do rio Mississippi, quando analisados isoladamente, não os exclui da tendência da relação funcional obtida com o agrupamento.

Para sedimentos unimodais no caso de *ripples* e dunas, o efeito da distribuição granulométrica das misturas fica mascarado devido à grande resistência oferecida pelas formas do leito, enquanto para leito plano o efeito das formas não existe e se torna detectável a influência da distribuição granulométrica das misturas sobre a função de resistência.

A relação gráfica funcional do fator B permite fazer a previsão da resistência nos canais aluviais quando a forma do leito é conhecida. A grande vantagem da metodologia proposta é que esta avalia a resistência total do leito sem a necessidade de separação dos efeitos dos grãos e das formas do leito, eliminando assim, um dos processos de grande incerteza na previsão da resistência hidráulica dos canais aluviais.

5.2 – Recomendações.

Com base nos resultados obtidos é recomendado que:

Estudos com maior número de dados de rios em diferentes regiões geográficas sejam realizados para que se possa avaliar melhor a variação da resistência através do parâmetro B e a universalidade das suas relações funcionais apresentadas;

A caracterização de outras misturas bimodais deve ser feita de uma forma mais adequada; e

Um estudo seja realizado com misturas que apresentem uma maior faixa de variação do diâmetro, incluindo assim os pedregulhos e cascalhos, para que se avalie a influência da distribuição granulométrica destas misturas e os efeitos da proteção das partículas mais finas pelas mais grossas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, A. M. Z. & KENNEDY, J. F., (1969). *Friction factors for flow in sand bed channels*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 95, pp 1973 – 1992.

BAGNOLD, R. A. (1956). *The flow of cohesionless grains in fluids*. Philosophical Transaction, Royal Society, London, Series A, Vol. 249, pp 235-297.

BENNETT, J. P. (1995). *Algorithm for resistance to flow and transport in sand bed channels*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.121(8), 578 – 590.

BENNETT, J. P. (1997). *Resistance, Sediment Transport and Bedform Geometry Relationships in Sand-Bed Channels*. Proceedings of the United States Geological Survey (USGS). Sediment Workshops, February 4-7.

BROOKS, N. H. (1958). *Mechanics of Streams with Movable Beds of Fine Sands*. Transactions, ASCE, vol. 123, pp 526 – 594.

CAVALCANTE, R. G. (1992). *Um Estudo Comparativo da Confiabilidade das Equações de Transporte de Sedimentos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campus II.

CHIEN, N. & WAN, Z. (1999). *Mechanics of Sediment Transport*. Reston, Va: ASCE. Chicago.

CHOW, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw – Hill Book Company, New York, USA, 680p.

CIOFFI, F. & GALLERANO, F. (1991). *Velocity and Concentration Profiles of Solid Particles in a Channel with Movable and Erodible Bed*. Journal of Hydraulic Research, vol. 29, N° 3, pp 387 – 399.

COLEMAN, N. L. (1981). *Velocity Profiles with Suspended Sediment*, Journal of Hydraulics Research, vol. 19, N° 3, pp 211 – 229.

COLEMAN, N. L. (1986). *Effects of Suspended Sediment on the open Channel Velocity Distribution*, Water Resources Research, vol. 22, N° 10, pp 1377 – 1384.

DuBUAT, P. (1786). *Principles d'Hydraulique*, 2nd Edition, De L' Imprimerie de Mosieur, Paris.

EINSTEIN, H. A. (1950). *The Bed Load Function for Sediment Transportation in Open Channels*, Technical Bulletin 1026, USDA.

EINSTEIN, H. A. & BARBAROSA, N. L. (1952) “*River Channel Roughness*”, Transactions, ASCE, Vol. 117, pp 1121-1146.

EINSTEIN, H. A. & CHIEN, N. (1954). *Second Approximation to the Solution of the Suspend Load Teory*. University of California Institute of Research, N° 3.

ENGELUND, F. (1966). “*Hydraulic Resistance of Alluvial Stream*”, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, HY2, pp 315 – 326.

ENGELUND, F. & HANSEN, E. (1967). “*Monograf on Sediment Transport in Alluvial Channels*”, Teknish Vorlag, Copenhagen.

GARDE, R. J. & RANGARAJU, K. G. (1966). “*Resistance Relationships for Alluvial Channels*”. Journal of the Hydraulics Division, vol. 92, N° HY 4, pp 77 – 100.

GUY, H. P., SIMONS, D. B., & RICHARDSON, E. V. (1966). “*Summary of Alluvial Channel Data from Flume Experiments, 1956 – 1961*”. U. S. Geological Survey Professional Paper 462 – I, Department of the Interior, Washington, D.C.

GRAFF, W. H., (1984), “*Hidraulics of Sediment Transport*”. Mc Graw Hill Book Company, New York, 513p.

HAQUE, M. I., & MAHMOOD, K. Y., (1986). “*Analytical Study on Steepness of Ripples and Dunes*”. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 112, pp 220 – 236.

IWAGAKI, Y. (1954). *On the Law of Resistance to Turbulent Flow in Open Rough Channels*. Proceedings of the 4th Japan National Congress for Applied Mechanics, pp. 229 – 233, Japan.

JAMES C. S. (1990). *Prediction of Entrainment Conditions for non Uniform and non Cohesive Sediments*. Journal of Hydraulic Research, vol. 28, n° 1, pp. 25-42.

JULIEN, P. Y. & RASLAN, Y. (1998). *Upper – Regime Plane Bed*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 124(11): 1086 - 1096.

KARIM, F. (1995). “*Bed Configuration and Hydraulic Resistance in Alluvial – Channel Flows*”. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 121 (1): 15 - 25.

KARIM, F. (1999). “*Bed-Form Geometry in Sand – Bed Flows*”. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125 (12): 1253 - 1261.

KEULEGAN, G. H., (1938). “*Laws of Turbulence flow in open channels*”. Journal, National Bureau of Standards, Washington, D.C., Research Paper 1151, Vol. 21, December, pp. 707-741.

KUNHLE, R. A. (1993). “*Incipient Motion of Sand-Gravel Sediment Mixtures*”. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.119 (12): 1400 - 1415.

LOVERA , F. & KENNEDY, J. F. (1969) “*Friction Factor for Flat Bed Flows in Alluvial Channels*”. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 95, N° HY 4, pp 1227 – 1234.

MANTZ, P. A. (1977). “*Incipient Transport of Fine Grains and Flakes by Fluids – Extend Shields Diagram*”. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, vol. 103, N° HY 6, pp 801-815.

MEDEIROS, V. R. G. (1999). *Uma investigação de Transporte de Sedimentos de Misturas Bimodais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campus II.

OGIHARA, Y., & MIAZAWA, N. (1991). “Laws of Resistance of Pipe Flow of Solid Liquid Mixtures”, Journal of Hydraulic Research, vol. 29, N° 2, pp 189 – 205.

PARKER, G. M. & ANDERSON, A. G. (1979), “*Basic Principles of River Hydraulics*”, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 103, HY9, pp 1077-1087.

RAUDKIVI, A. J. (1976). *Loose Boundary Hydraulics*. 2nd Ed. Pergamon Press International, New York, 348p.

RÊGO, J. C., (1981). *Relações de Resistência e de Transporte para Canais Aluviais*. Dissertação de Mestrado, Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, Campus II.

SAMAGA, B. R., RANGARAJU, K. G. & GARDE, R. J. (1986). *Bed Load Transport of Sediment Mixtures*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, vol. 112, N° 11, pp 1003 – 1018.

SCHOKLITSCH, A. (1950). “*River Bed Degradation Below Large Capacity Reservoir*” Transactions. ASCE, vol. 122, pp. 688 – 695.

SHEN, H. W. (1962). Development of Bed Roughness in Aluvial Channels. Journal of the Hydraulics Division, vol. 88, N° HY3, pp 45 – 58.

SILVA, R. C. V. da & JÚNIOR, W. J. (2005). *Hidráulica Fluvial*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, Vol 2, 255p.

SILVA, R. C. V. da, MASCARENHAS, F. C. B. & MIGUEZ, M. G. (2003). *Hidráulica Fluvial*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, Vol 1, 306p.

SIMONS, D. B. & RICHARDSON, E. V. (1962). “*Depth Discharge Relation in Aluvial Channels*”. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 88, N° HY 5, pp 57-72.

SIMONS, D. B. & SENTURK, F. (1976, 1992). *Sediment Transport Technology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 807p.

SIQUEIRA, M. T. (1997). *Estudo da Influência da Distribuição Granulométrica sobre o Transporte e Resistência em Canais Erodíveis*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFPB, Campina Grande – PB.

SMITH, J. D. & McLEAN, S. R. (1977). “*Spatially averaged flow over a wavy surface*” *Journal Geophys. Res.*, 84(12), 1735 – 1746.

SRINIVASAN, V. S. (1969). *The Mechanics of Flat Bed Flow and Occurrence of Bed Forms in Alluvial Channels*. Thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy, University of Waterloo, Ontario, Canadá.

SRINIVASAN, V. S. (1992). *Uma Metodologia para a Previsão e Análise da Resistência nos Canais Aluviais*. Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus II, para o Concurso Público de Professor Titular na Área de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil, Campina Grande.

SRINIVASAN, V. S., ALCÂNTARA, H. M. de, MEDEIROS, V. R. G. & SIQUEIRA, M. T. (2005). “*A influência da distribuição granulométrica sobre a resistência de canais erodíveis*” in Anais em CD-ROM do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa – PB.

SRINIVASAN, V. S. ALCÂNTARA, H. M. de & SIQUEIRA, M. T. (2006). “*A Influência das Formas do Leito e da Distribuição Granulométrica sobre a Resistência em Canais Erodíveis*” in Anais em CD-ROM do VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Gravatá – PE.

SRINIVASAN, V. S. & ALCÂNTARA, H. M. de, (2006). “*Funções de Resistência Total para Canais Aluviais com Diferentes Formas do Leito*”. in Anais em CD-ROM do VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Porto Alegre – RS.

SRINIVASAN, V. S. & HILL, M. H., (1985). *A Roughness Instability Function for Analysis of Flow in Alluvial Channels*. Anais do VI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vol. 1, pp. 243-257.

UMEYAMA, M., & GERRITSEN, F. (1992). "Velocity Distribution in Uniform Sediment Laden Flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 118, N° 2, pp 229 – 245.

VAN RIJN, L. C. (1984a). "*Sediment transport, part I: Bed Load Transport*". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110 (10), 1431 – 1456.

VAN RIJN, L. C. (1984b). "*Sediment transport, part II: Suspend Load Transport*". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110 (11), 1613 – 1641.

VAN RIJN, L. C. (1984c). "*Sediment transport, part III: Bed forms and alluvial roughness*". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110 (12), 1733 – 1754.

VANONI, V. A., & BROOKS, N. H. (1957). "*Laboratory Studies of the Roughness and Suspend Load of Alluvial Streams*". Report N° E – 68, Sedimentation Laboratory, California

VANONI, V. A., Editor (1975). "*Sedimentation Engineering*", Publication N° 54, ASCE, New York.

VANONI, V. A. (1984). "*Fifty Years of Sedimentation*". *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 110, N° 8, pp. 1021 – 1057.

WADELL, H. A. (1932). Volume, shape and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, 40: 443 – 451.

WANG, S. Y. (1981). "*Variation of Karman Constant in Sediment Laden Flow*". *Journal of Hydraulic Division*, vol. 107, N° 3, pp 407 – 418.

WIBERG, P. L., & SMITH, J. D. (1991). "*Velocity Distribution and Bed Roughness in High Gradient Streams*". *Water Resources Research*, Vol.27, N° 5, pp 825 – 838.

WILCOCK, P. R. & SOUTHARD, J. B. (1989). "*Experimental Study of Incipient Motion in Mixed-Size Sediments*". *Water Resources Research*, vol. 24, N° 7, pp 1137-1151.

WILCOCK, P.R. & MCARDELL, B.W. (1993). "*Surface Based Fractional Transport Rates: Mobilization Thresholds and Partial Transport of Sand - Gravel Sediment*". *Water Resources Research*, Vol.29(4): 1297-1312.

WIBERG, P.L., & SMITH, J.D. (1987). “*Calculation of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments*”, Water Resources Research, Vol. 23(6): 1471-1480.

WU, W. M., & WANG, S. S. Y. (1999). “*Movable bed roughness in alluvial rivers*”. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125(12): 1309 – 1312.

YALIN, M. S., & KARAHAN, E. (1979). “*Steepness of Sedimentary Dunes*”, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 105, N° HY 11, pp 1433 – 1443.

YANG, S. Q., TAN, S.K. & LIM, S.Y. (2005). “*Flow Resistance and bed geometry in a wide alluvial channel*”. Water Resources Research, Vol. 41(1), W09419, 1 – 8.

YU, G. L., & LIM, S. Y. (2003). “*Modified Manning Formula for Flow in Alluvial Channels with Sand Beds*”. Journal of Hydraulic Research, 41(6), 597 – 608.

ZNAMENSKAYA, N. S. (1963). Experimental study of the dune movement of sediment, Transactions State Hydrologic Institute (Trudy GGI), N° 108.

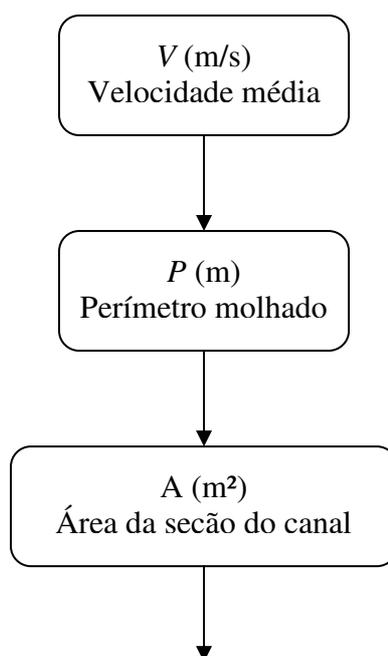
ANEXOS

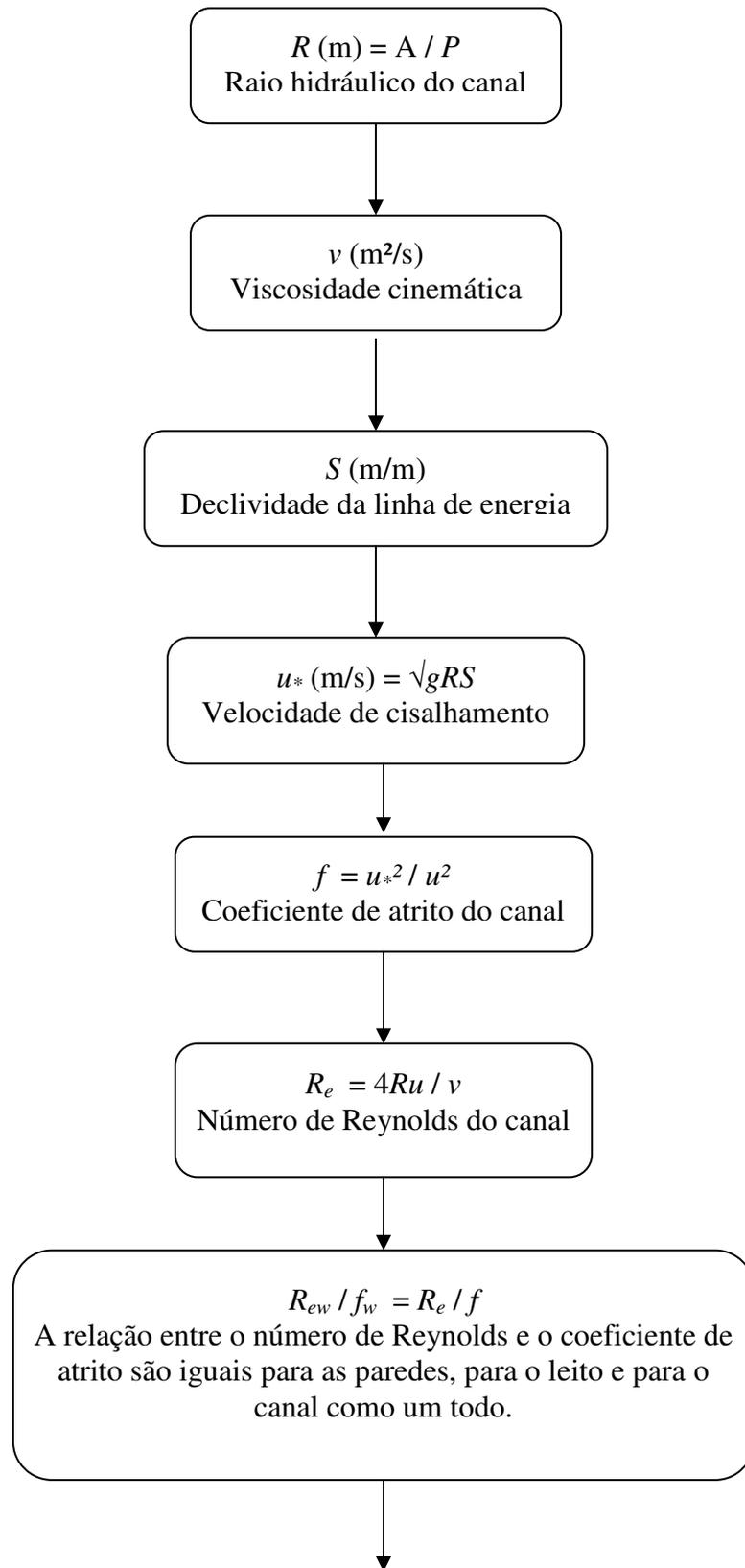
ANEXO A - MÉTODO DE VANONI E BROOKS (1957)

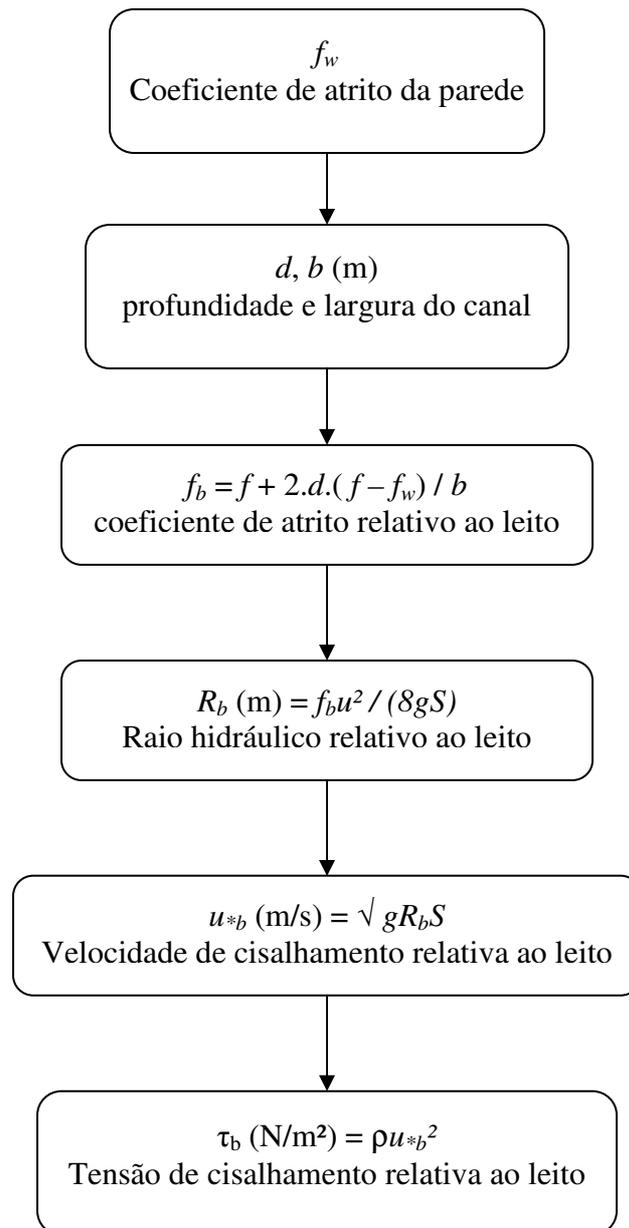
O método proposto por Vanoni & Brooks (1957) tem a finalidade de corrigir o efeito das paredes laterais dos canais de laboratório onde geralmente a rugosidade do leito difere da rugosidade das paredes laterais. O método é constituído por um procedimento de cálculo que permite a determinação de uma força de cisalhamento sobre o leito como se o canal fosse largo e não existisse a influência das paredes laterais. Segundo os autores da metodologia proposta os dados obtidos em canais de laboratório quando corrigidos podem ser comparados aos dados de campo, ou de rios. Para o desenvolvimento da metodologia são realizadas as seguintes hipóteses:

- 1) a seção transversal pode ser dividida em duas seções, uma produzindo cisalhamento no leito e outra nas paredes;
- 2) a velocidade em cada seção é igual a velocidade do canal;
- 3) o raio hidráulico R , a velocidade de cisalhamento u_* , o coeficiente de atrito f e o número de Reynolds R_e , podem ser calculados para cada seção, como se cada um fosse de um canal;
- 4) as rugosidades das superfícies são homogêneas, embora diferentes.

Procedimento de Cálculo.







Foi assumido que a relação de Darcy – Weisback pode ser aplicada para cada parte da seção crítica bem como para a seção como um todo, ou seja:

$$\frac{u^2}{S} = \frac{8 \cdot g \cdot A_t}{f \cdot p} = \frac{8 \cdot g \cdot A_b}{f_b \cdot P_b} = \frac{8 \cdot g \cdot A_w}{f_w \cdot P_w}$$

Portanto:

$$A_t = A_b + A_w$$

onde: A_b é a área do leito e A_w é a área das paredes.

ANEXO B – FIGURAS OBTIDAS ATRAVÉS DAS RELAÇÕES FUNCIONAIS.

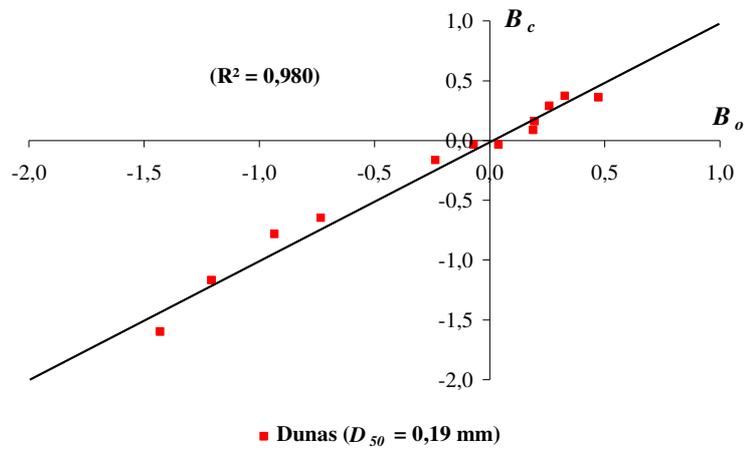


Figura B.1 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com três parâmetros – Guy *et al.* (1966).

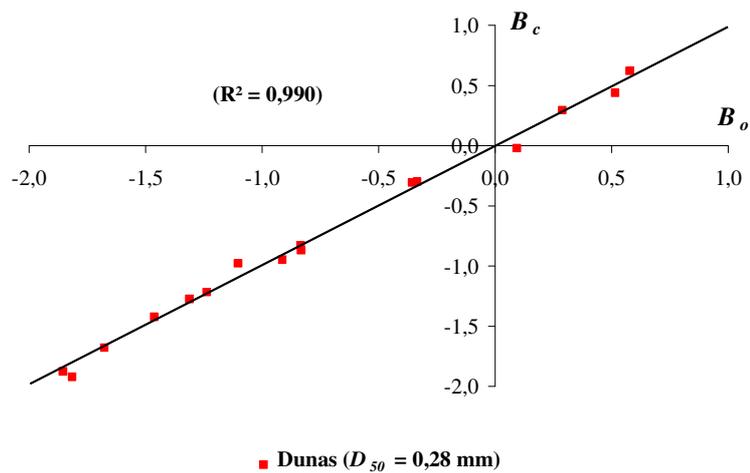


Figura B.2 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 3 com três parâmetros – Guy *et al.* (1966).

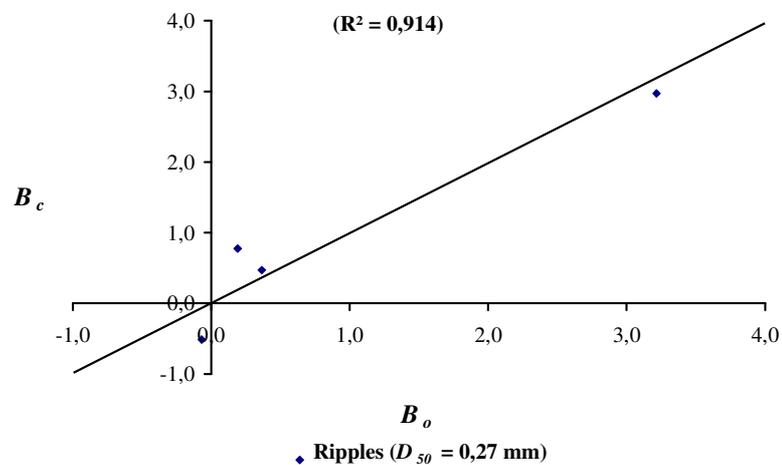


Figura B.3 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para *ripples* – Mistura 2 com dois parâmetros – Guy *et al.* (1966).

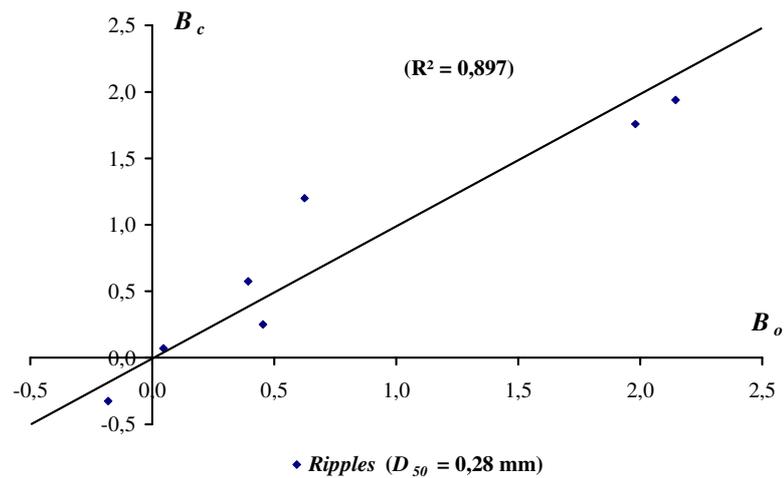


Figura B.4 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para *ripples* – Mistura 3 com dois parâmetros – Guy *et al.* (1966).

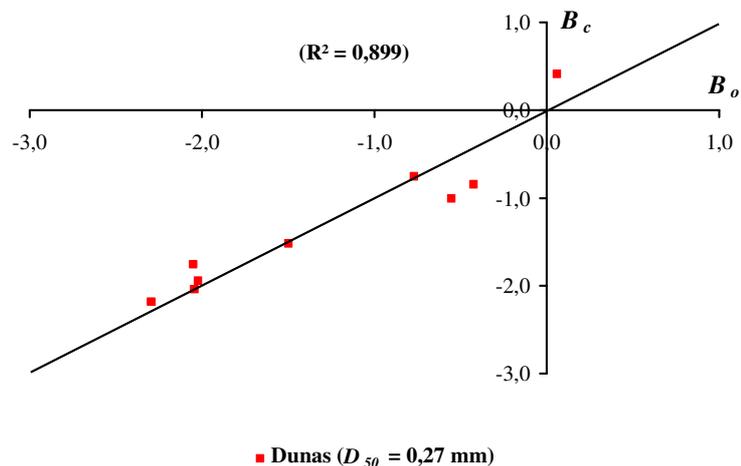


Figura B.5 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para *dunas* – Mistura 2 com dois parâmetros – Guy *et al.* (1966).

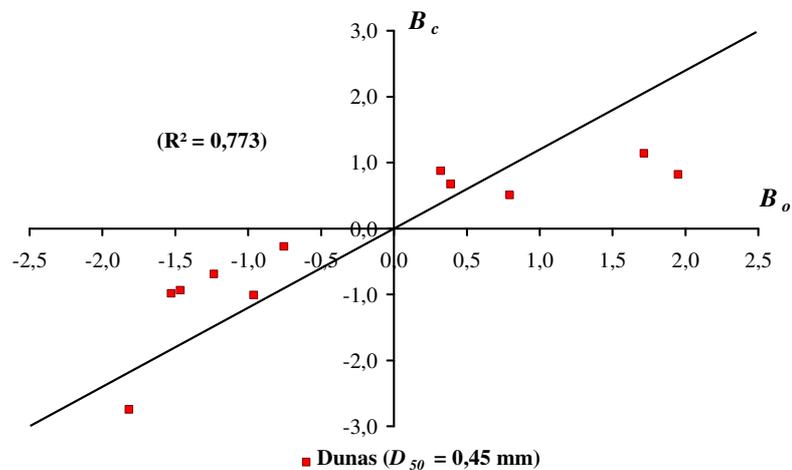


Figura B.6 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para *dunas* – Mistura 4 com dois parâmetros – Guy *et al.* (1966).

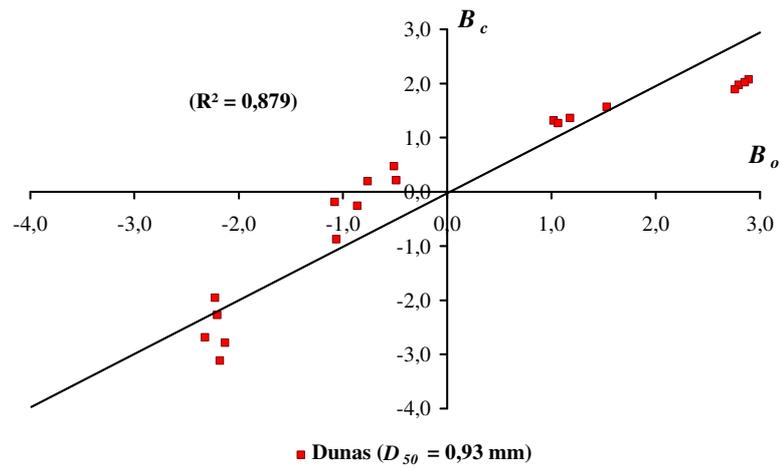


Figura B.7 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 9 com dois parâmetros – Guy *et al.* (1966).

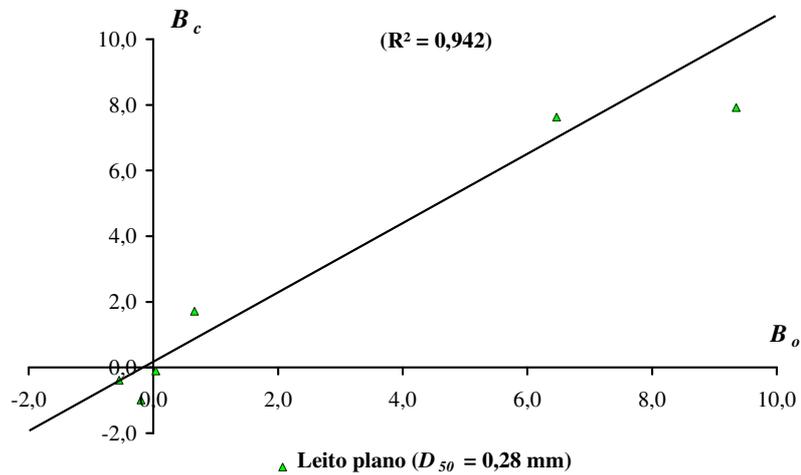


Figura B.8 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 3 com dois parâmetros – Guy *et al.* (1966).

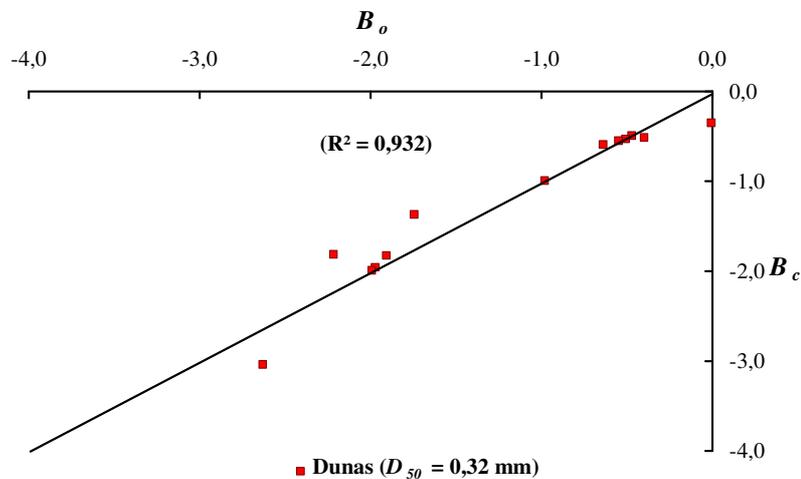


Figura B.9 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 5 com três parâmetros – Guy *et al.* (1966).

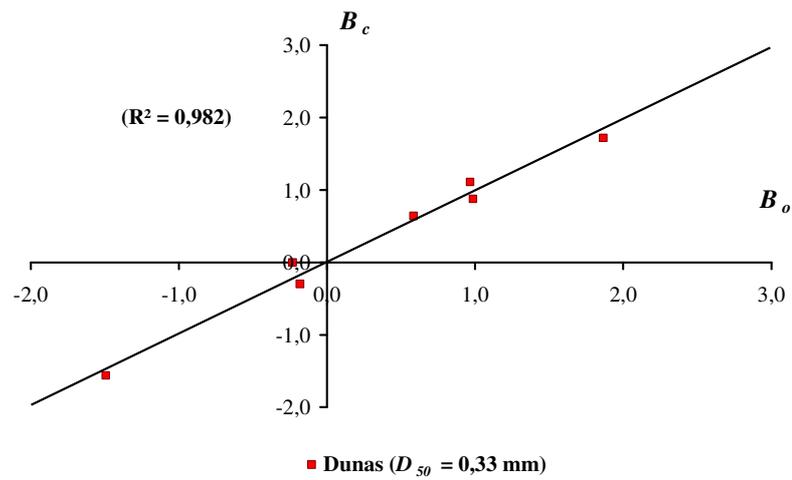


Figura B.10 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 6 com três parâmetros – Guy *et al.* (1966).

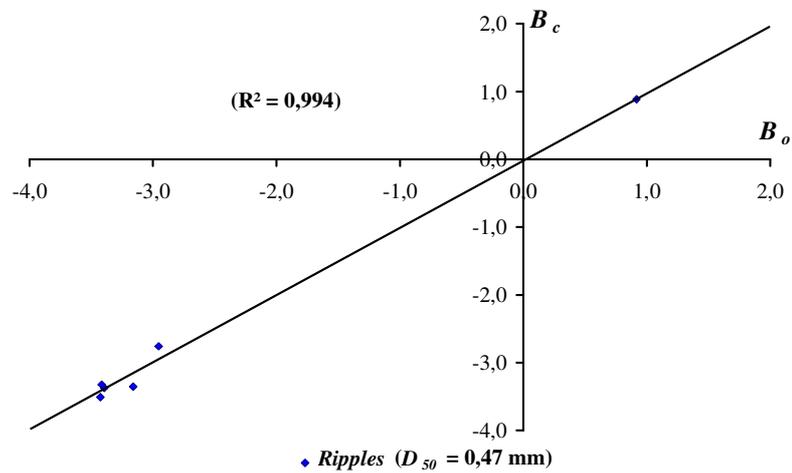


Figura B.11 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para ripples – Mistura 7 com três parâmetros – Guy *et al.* (1966).

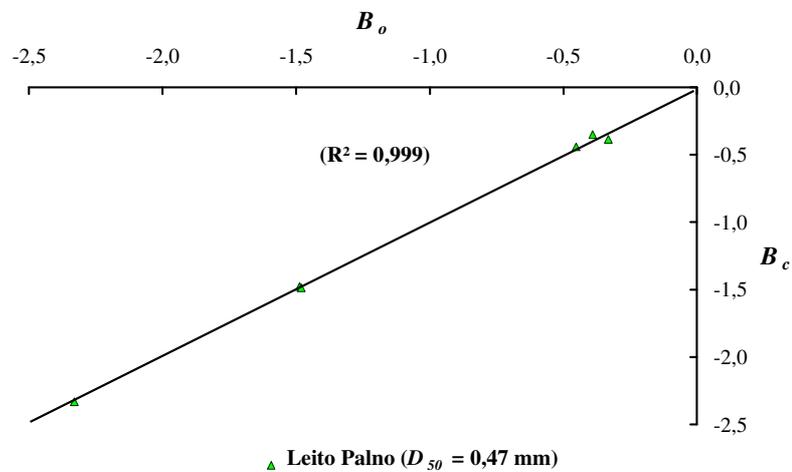


Figura B.12 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 7 com três parâmetros – Guy *et al.* (1966).

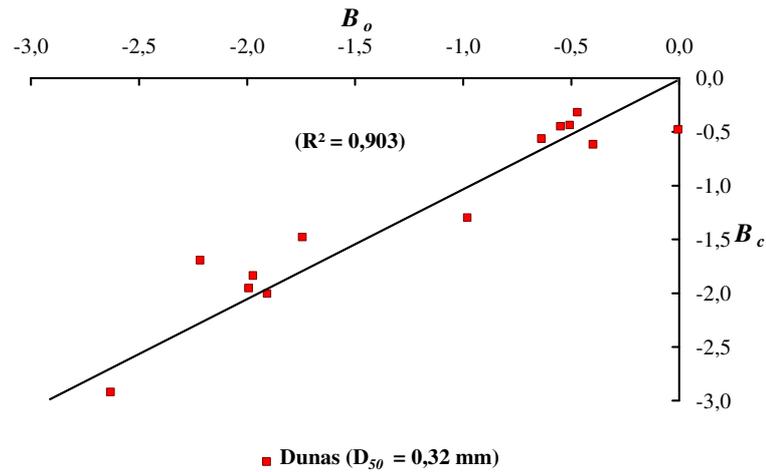


Figura B.13 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 5 com dois parâmetros – Guy *et al.* (1966).

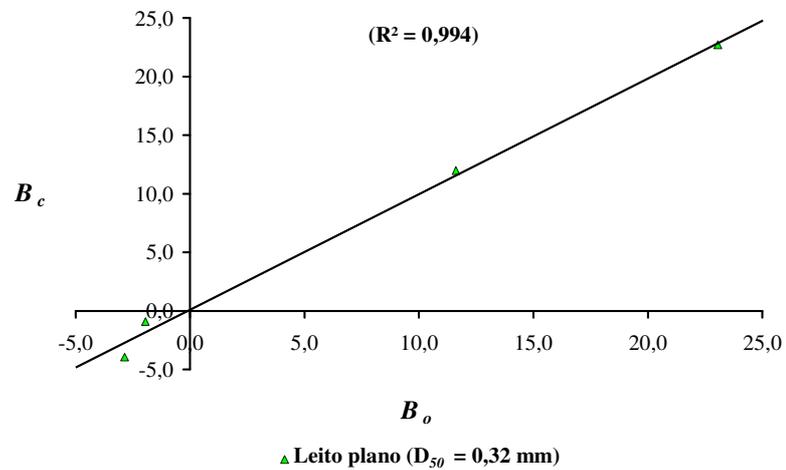


Figura B.14 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 5 com dois parâmetros – Guy *et al.* (1966).

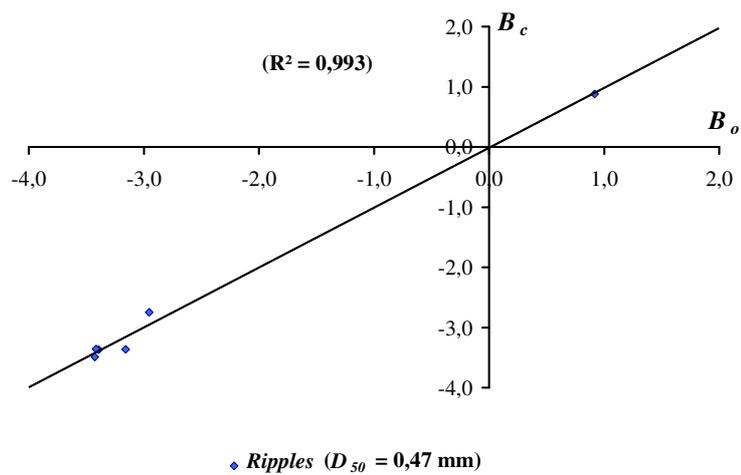


Figura B.15 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para ripples – Mistura 7 com dois parâmetros – Guy *et al.* (1966).

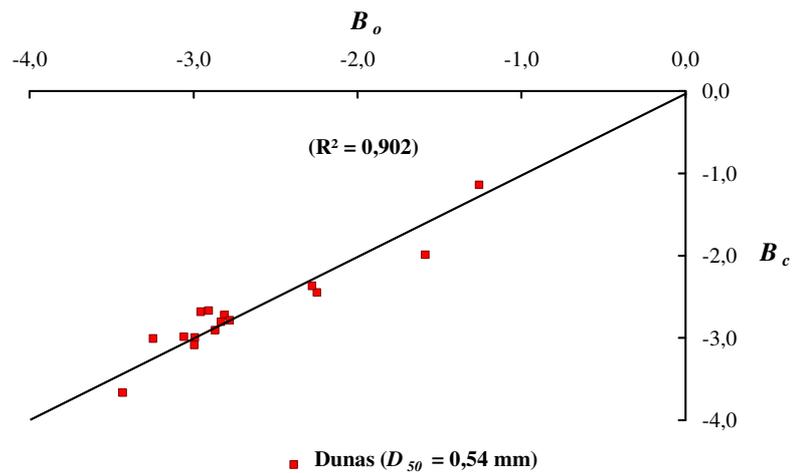


Figura B.16 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 8 com dois parâmetros – Guy *et al.* (1966).

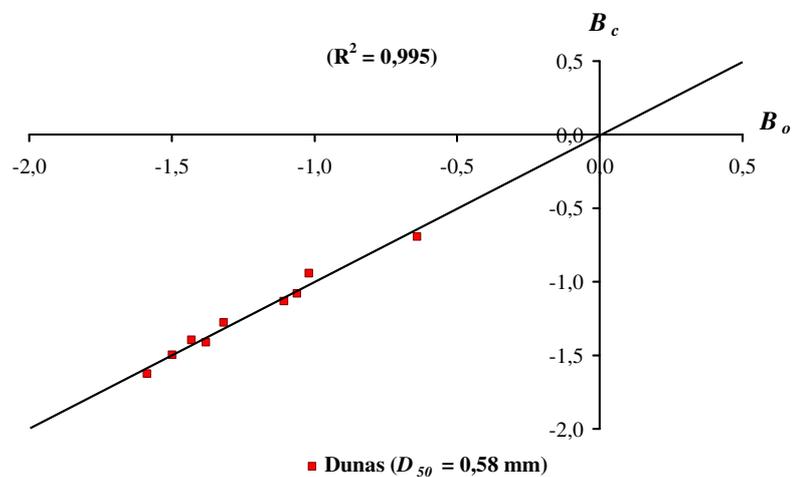


Figura B.17 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com três parâmetros – Samaga *et al.* (1986).

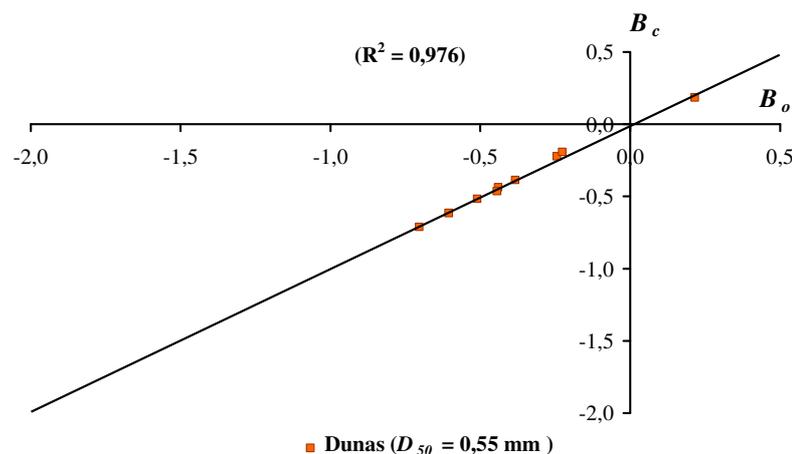


Figura B.18 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com três parâmetros – Samaga *et al.* (1986).

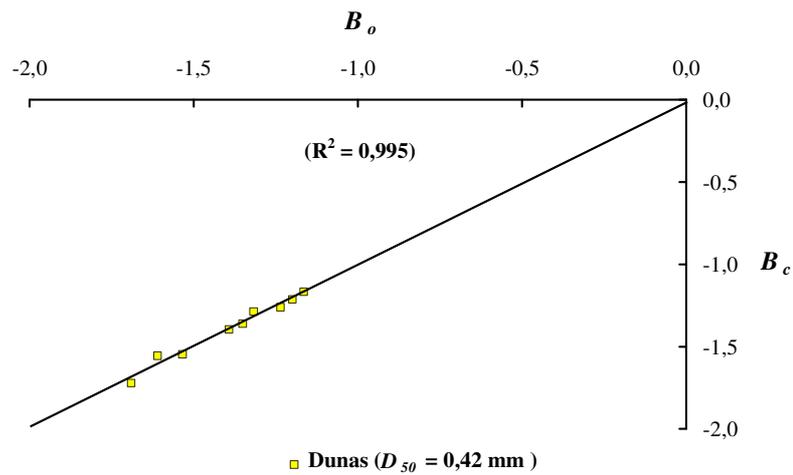


Figura B.19 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 3 com três parâmetros – Samaga *et al.* (1986).

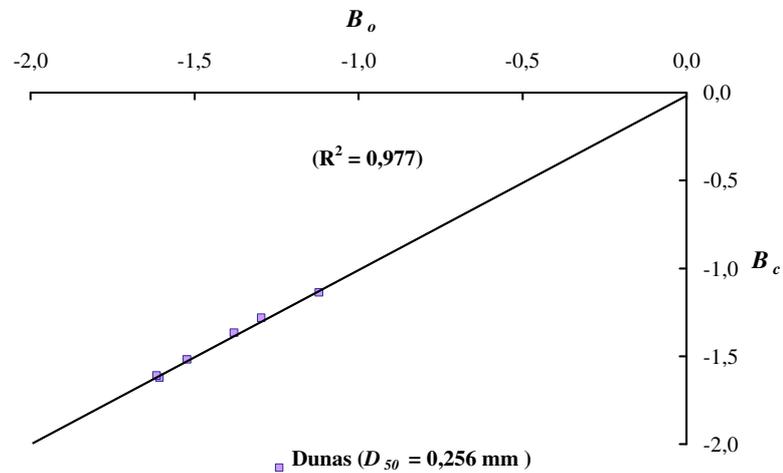


Figura B.20 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 4 com três parâmetros – Samaga *et al.* (1986).

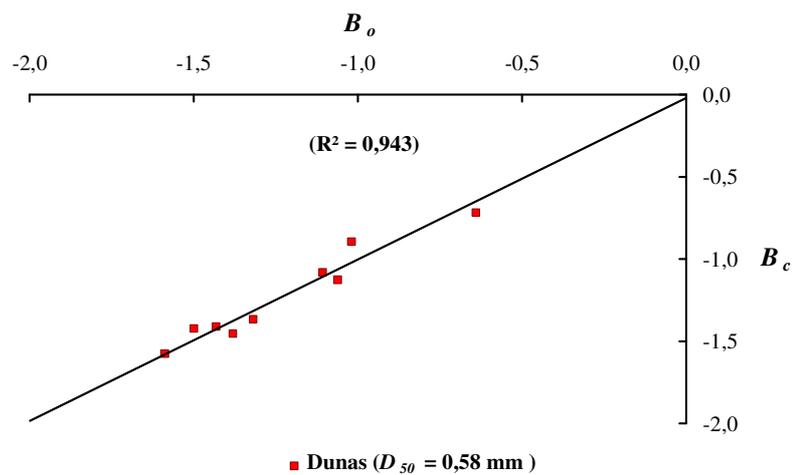


Figura B.21 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com dois parâmetros – Samaga *et al.* (1986).

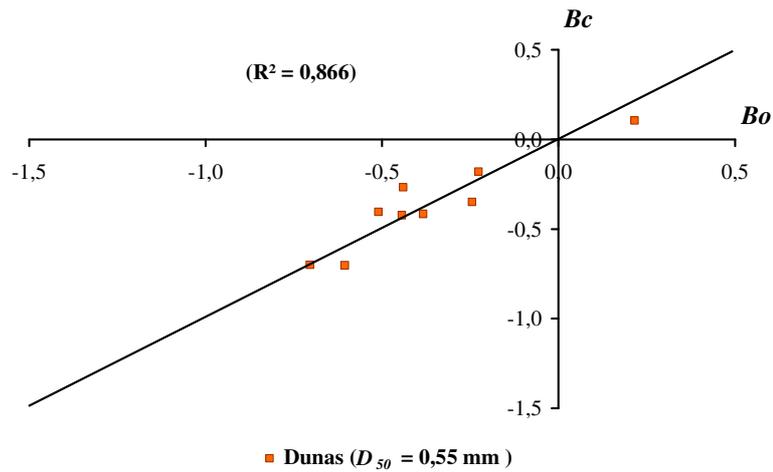


Figura B.22 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com dois parâmetros – Samaga *et al.* (1986).

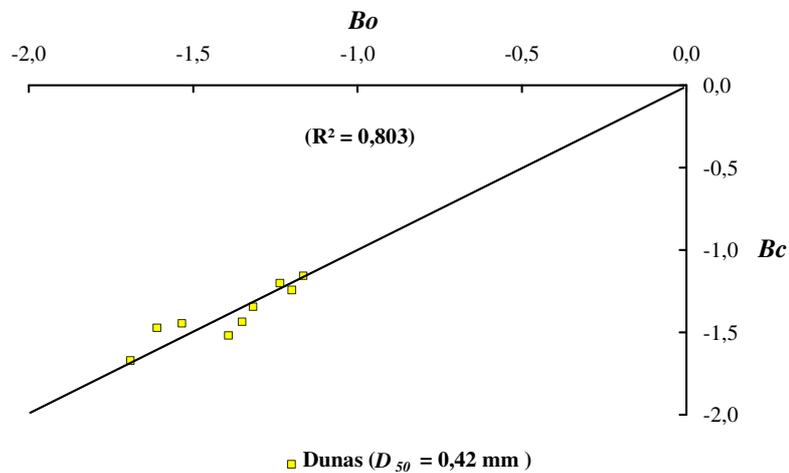


Figura B.23 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 3 com dois parâmetros – Samaga *et al.* (1986).

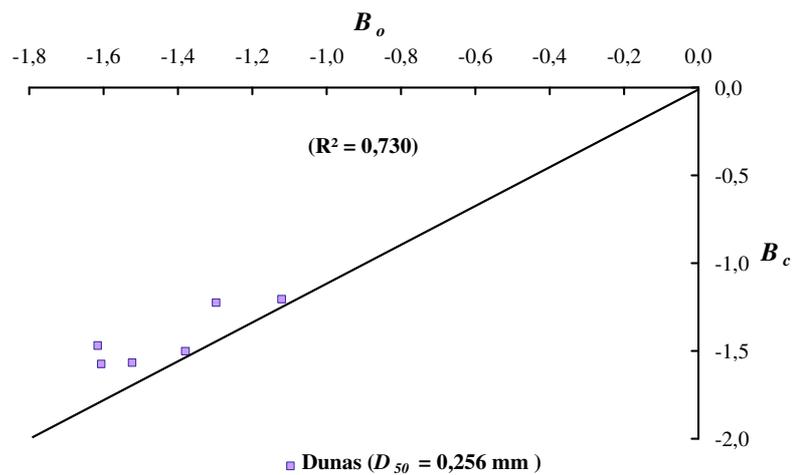


Figura B.24 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 4 com dois parâmetros – Samaga *et al.* (1986).

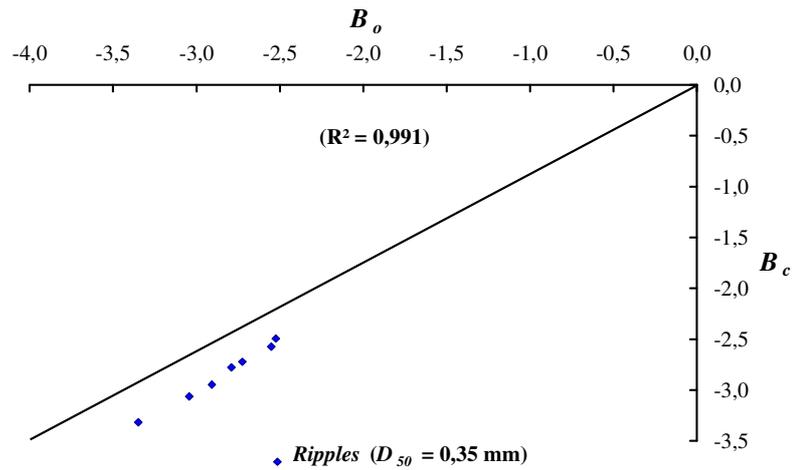


Figura B.25 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para *ripples* – Mistura 1 com três parâmetros – Cavalcante (1992).

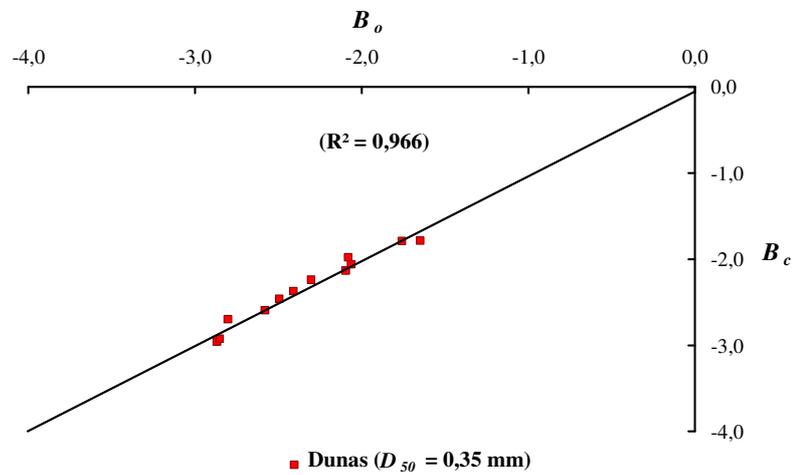


Figura B.26 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para *dunas* – Mistura 1 com três parâmetros – Cavalcante (1992).

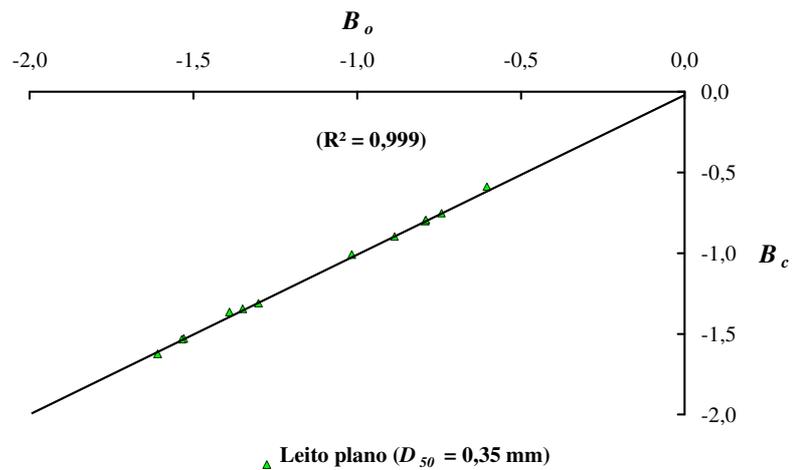


Figura B.27 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para *leito plano* – Mistura 1 com três parâmetros – Cavalcante (1992).

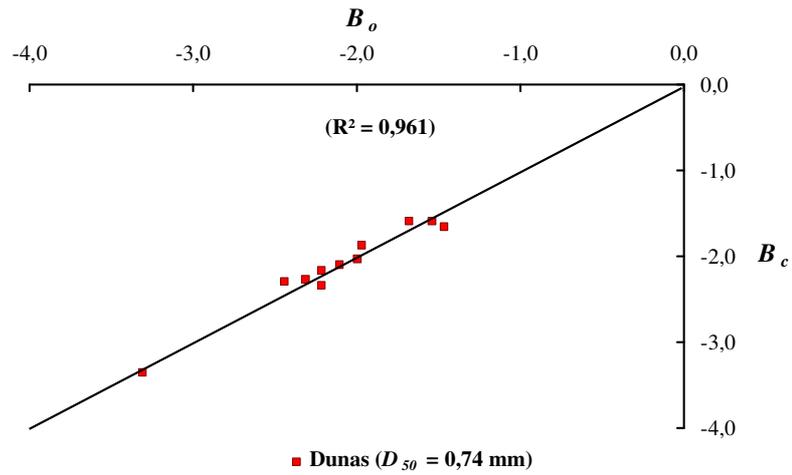


Figura B.28 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com três parâmetros – Cavalcante (1992).

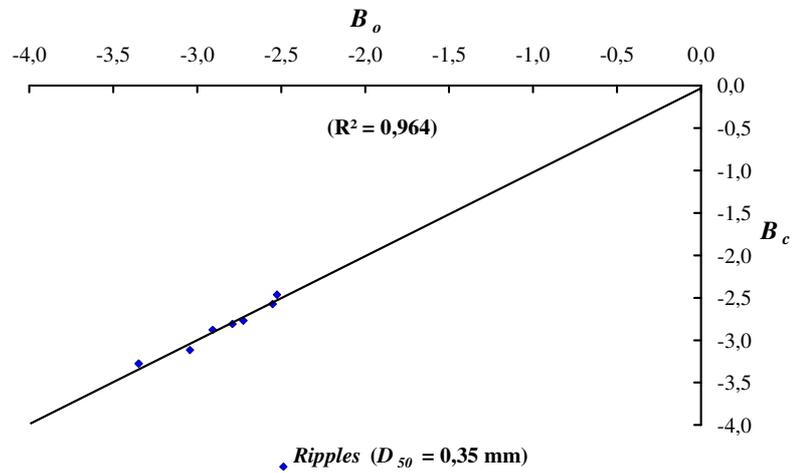


Figura B.29 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para ripples – Mistura 1 com dois parâmetros – Cavalcante (1992).

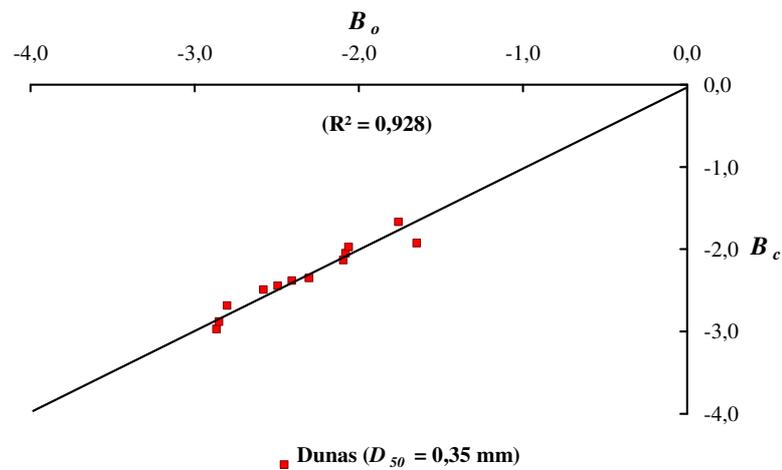


Figura B.30 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 1 com dois parâmetros – Cavalcante (1992).

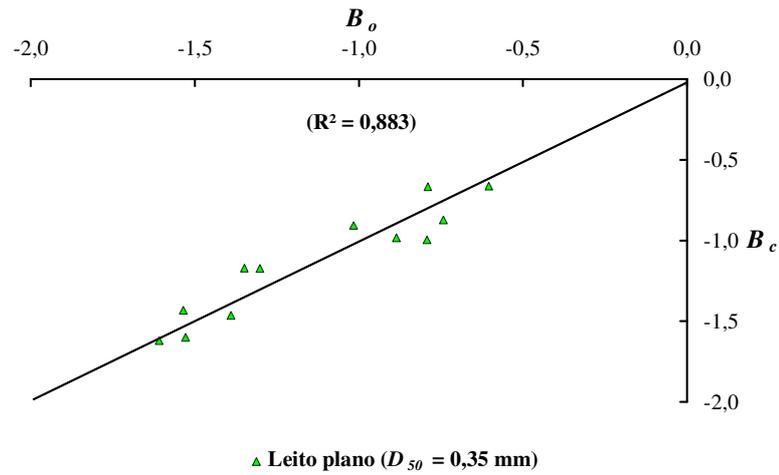


Figura B.31 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 1 com dois parâmetros – Cavalcante (1992).

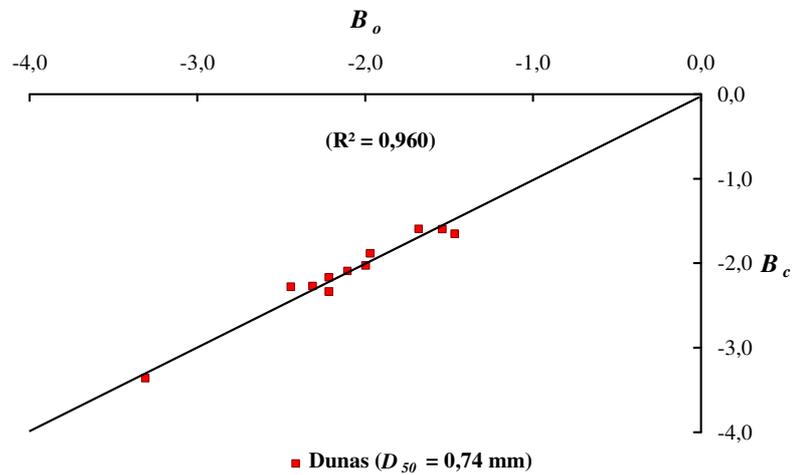


Figura B.32 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas – Mistura 2 com dois parâmetros – Cavalcante (1992).

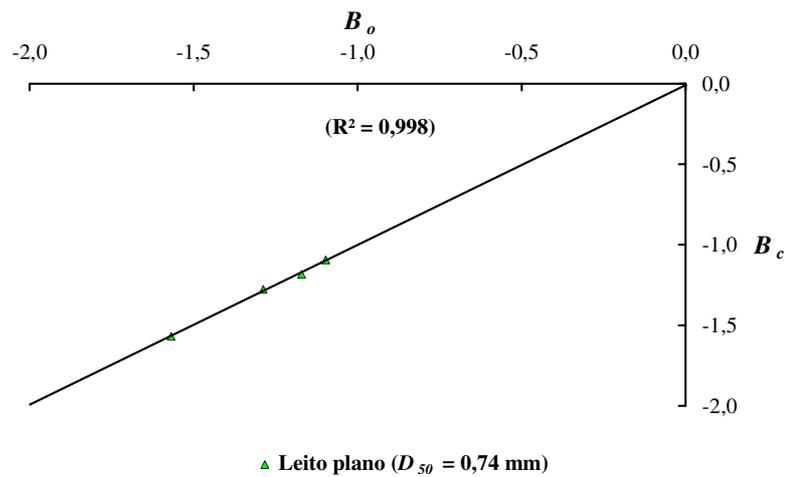


Figura B.33 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 2 com dois parâmetros – Cavalcante (1992).

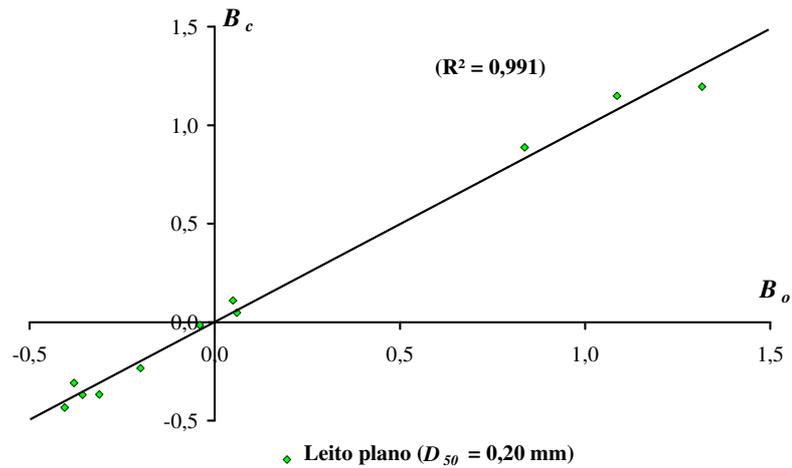


Figura B.34 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 1 com três parâmetros – Julien & Raslan (1998).

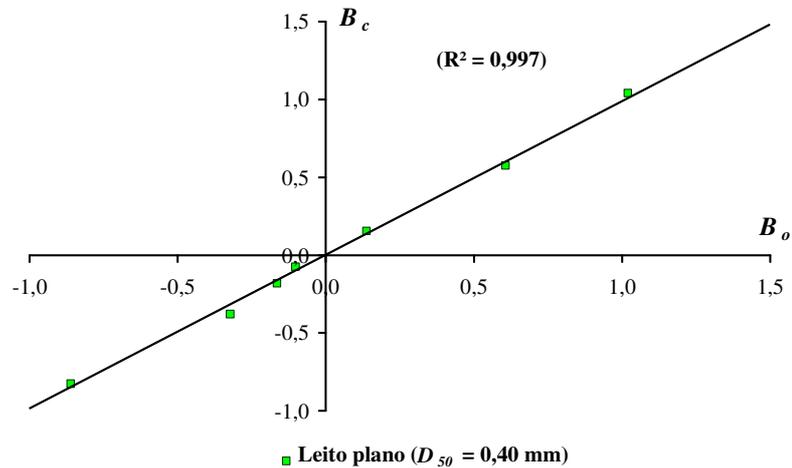


Figura B.35 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 2 com três parâmetros – Julien & Raslan (1998).

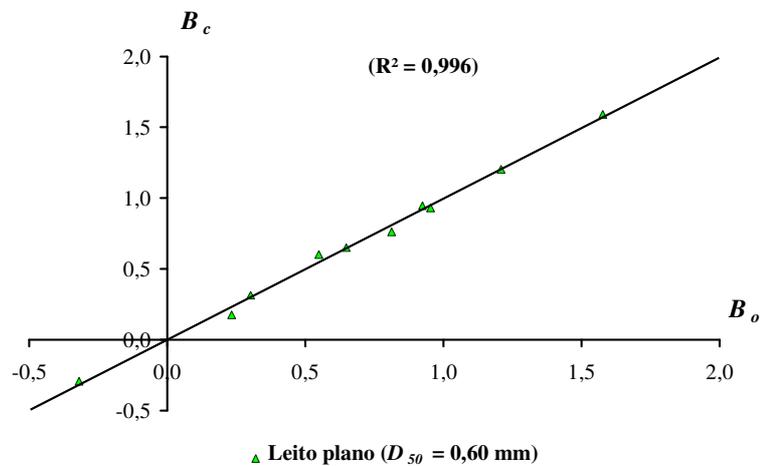


Figura B.36 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 3 com três parâmetros – Julien & Raslan (1998).

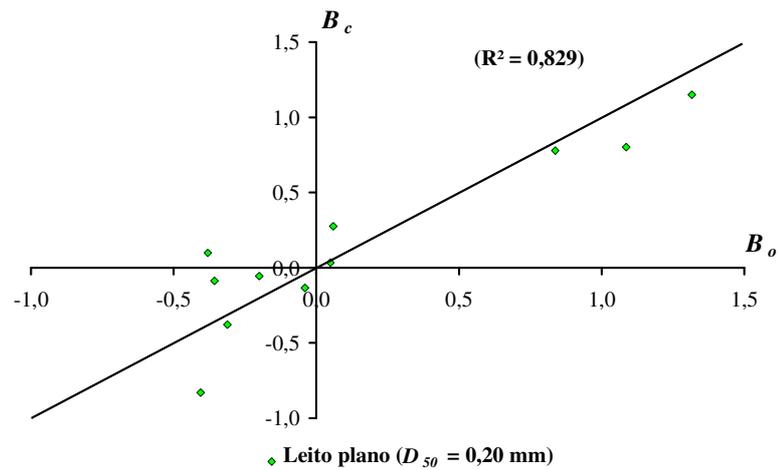


Figura B.37 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 1 com dois parâmetros – Julien & Raslan (1998).

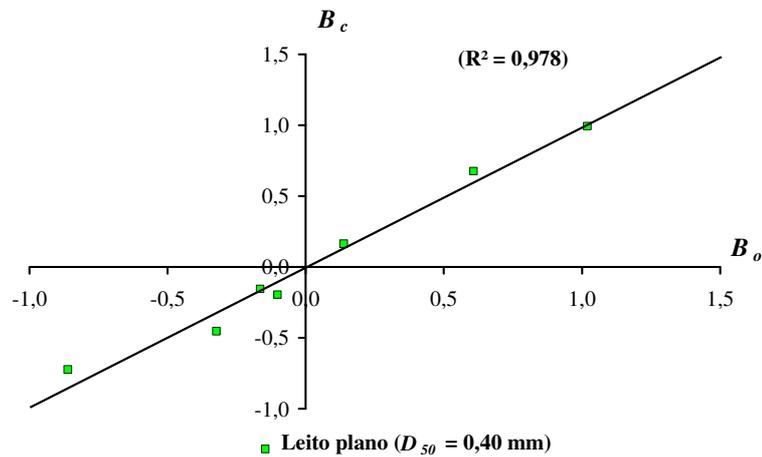


Figura B.38 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 2 com dois parâmetros – Julien & Raslan (1998).

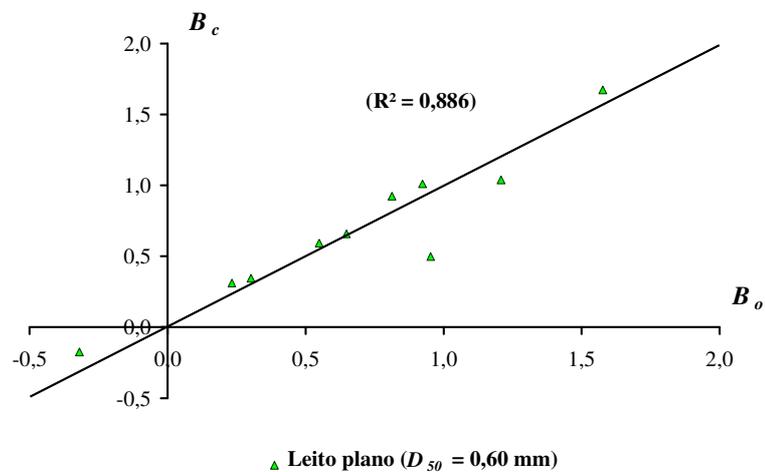


Figura B.39 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano – Mistura 3 com dois parâmetros – Julien & Raslan (1998).

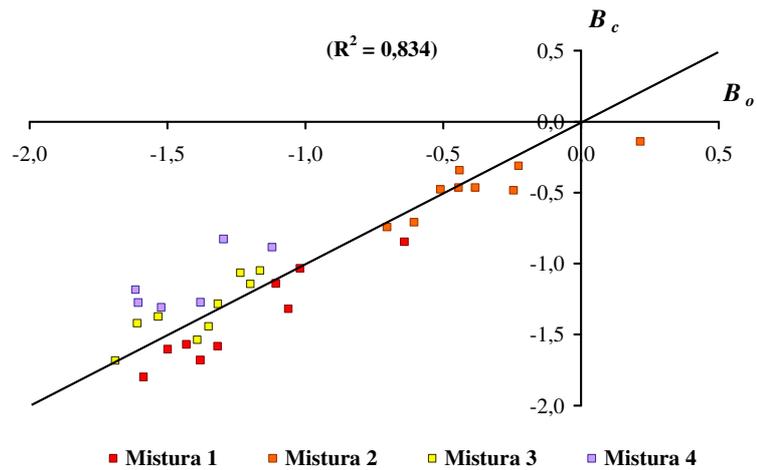


Figura B.40 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com três parâmetros – Samaga *et al.* (1986).

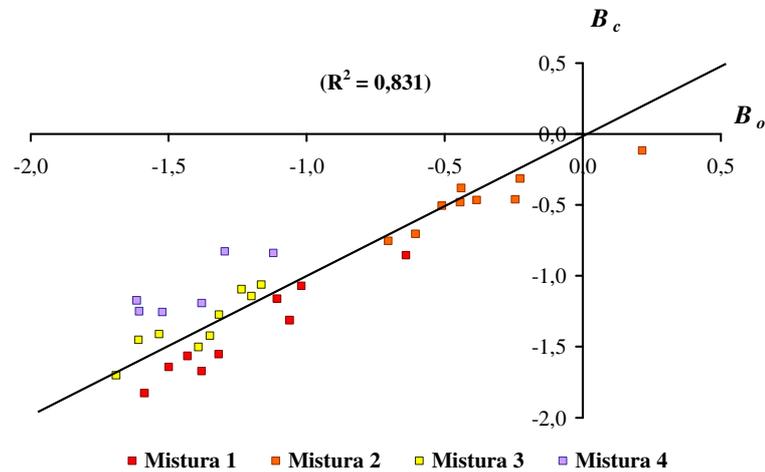


Figura B.41 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com dois parâmetros – Samaga *et al.* (1986).

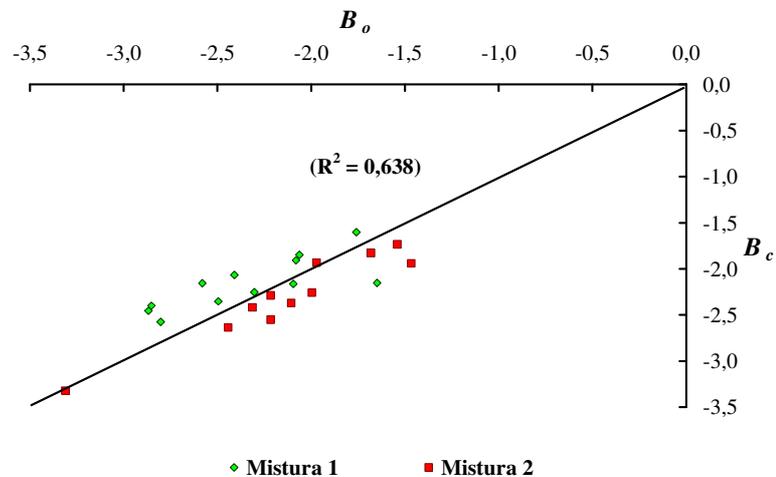


Figura B.42 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com três parâmetros – Cavalcante (1992).

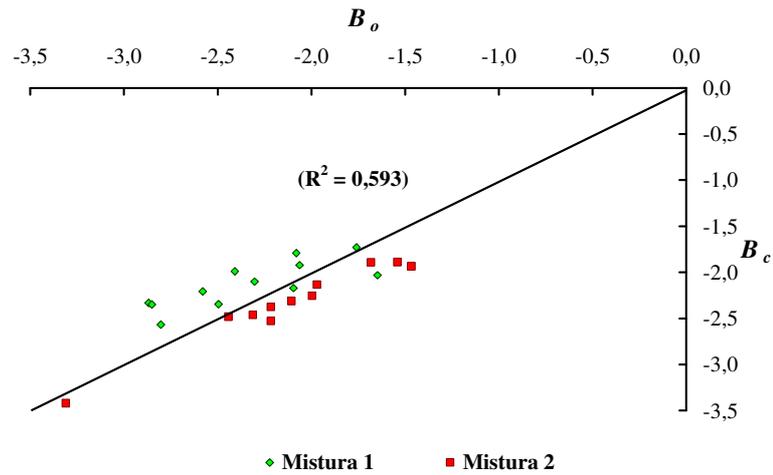


Figura B.43 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados com dois parâmetros – Cavalcante (1992).

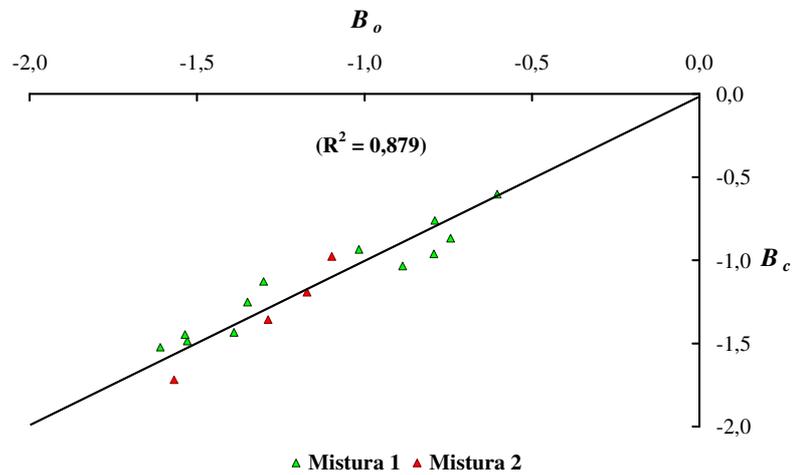


Figura B.44 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com três parâmetros – Cavalcante (1992).

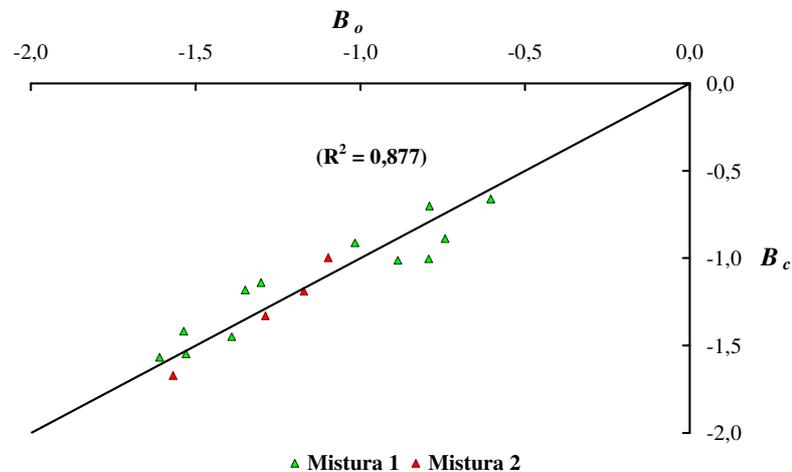


Figura B.45 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados com dois parâmetros – Cavalcante (1992).

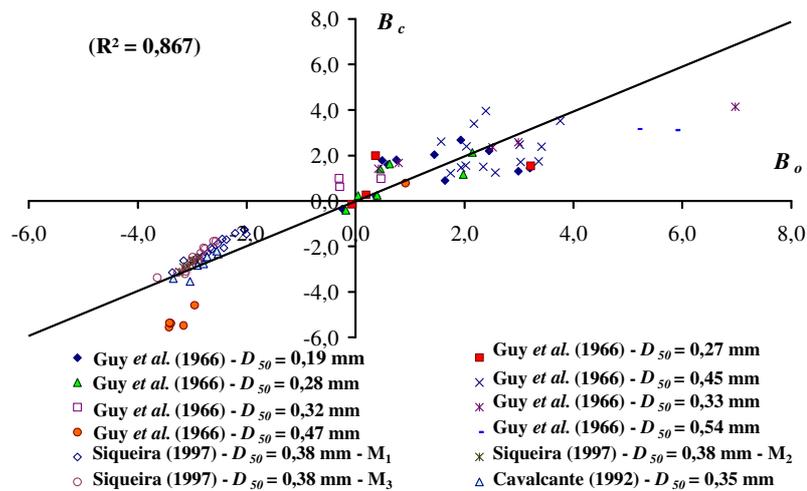


Figura B.46 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para *ripples* com dados agrupados – Canais de Laboratório com três parâmetros.

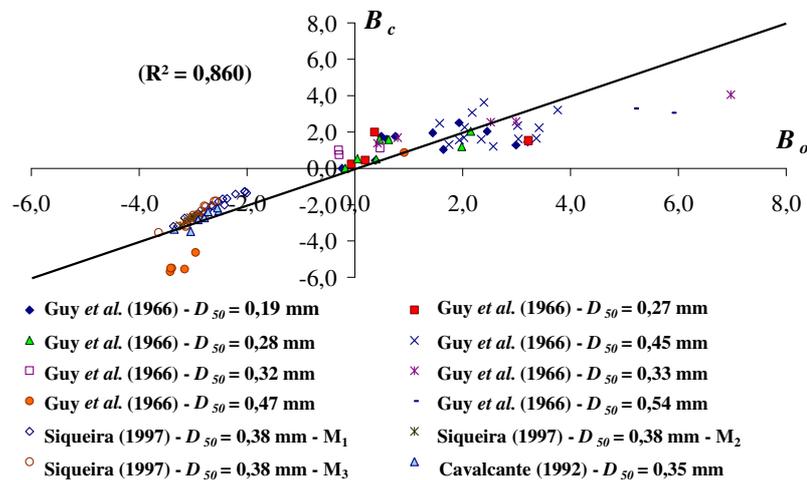


Figura B.47 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para *ripples* com dados agrupados – Canais de Laboratório com dois parâmetros.

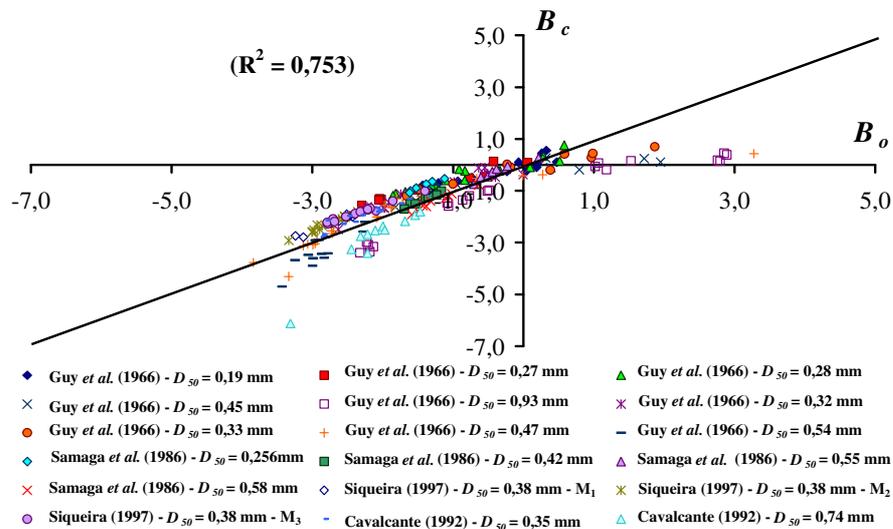


Figura B.48 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados – Canais de Laboratório com três parâmetros.

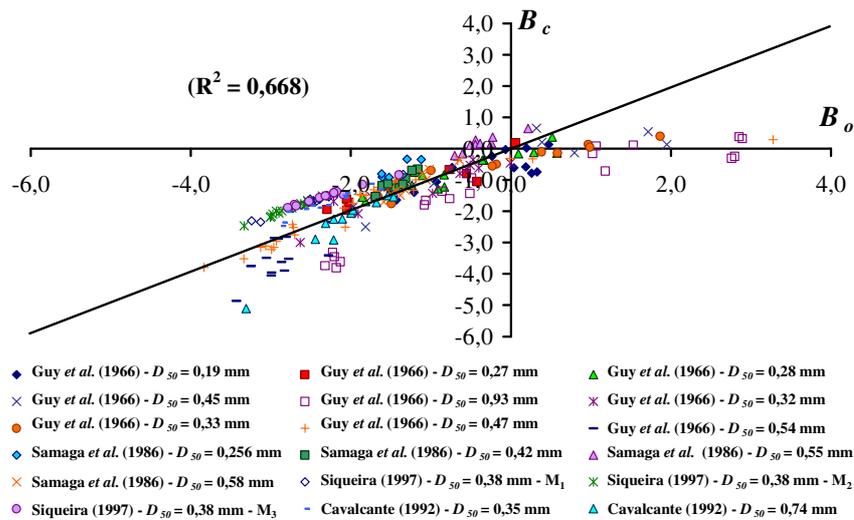


Figura B.49 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados – Canais de Laboratório com dois parâmetros.

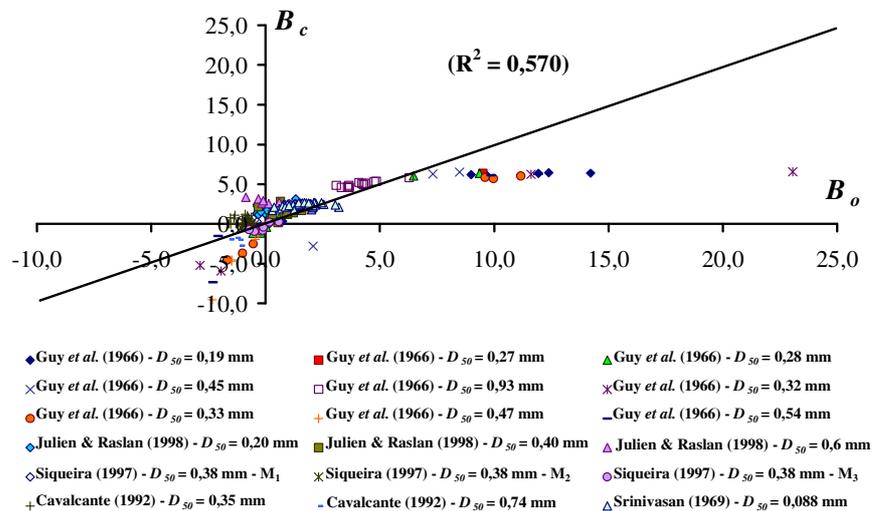


Figura B.50 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados – Canais de Laboratório com três parâmetros.

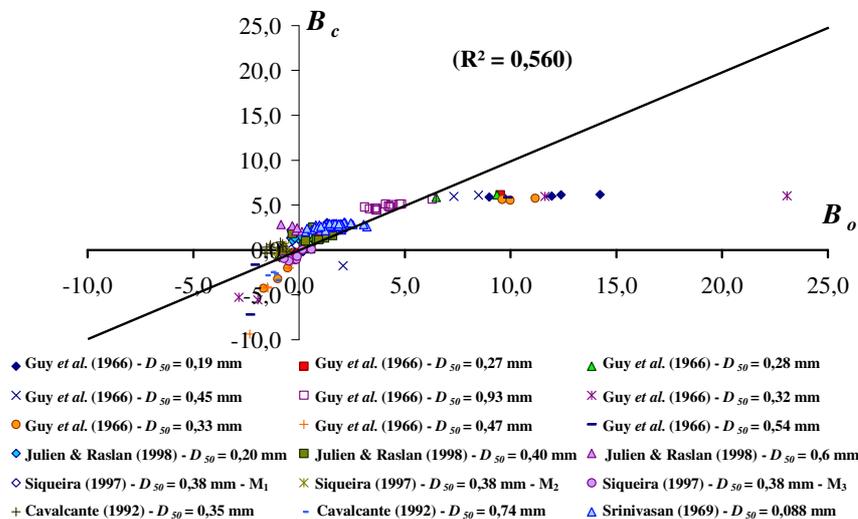


Figura B.51 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados – Canais de Laboratório com dois parâmetros.

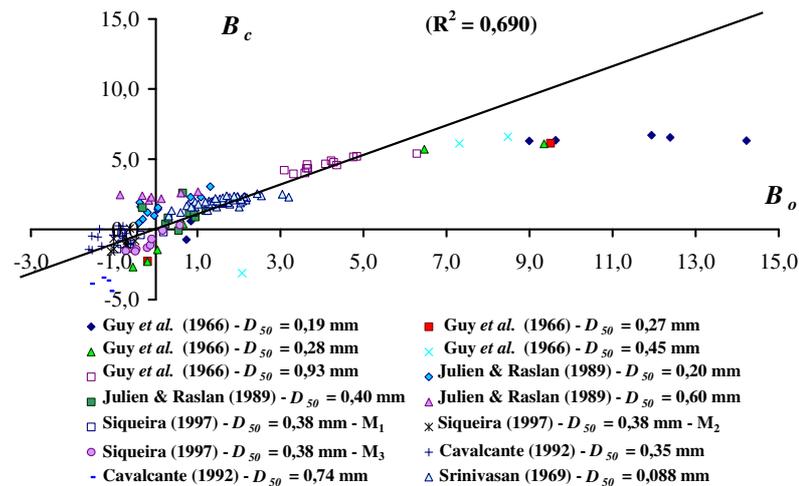


Figura B.52 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados – Canais de Laboratório excluindo os dados obtidos por Guy *et al.* (1966) no canal de 0,61m de largura com três parâmetros.

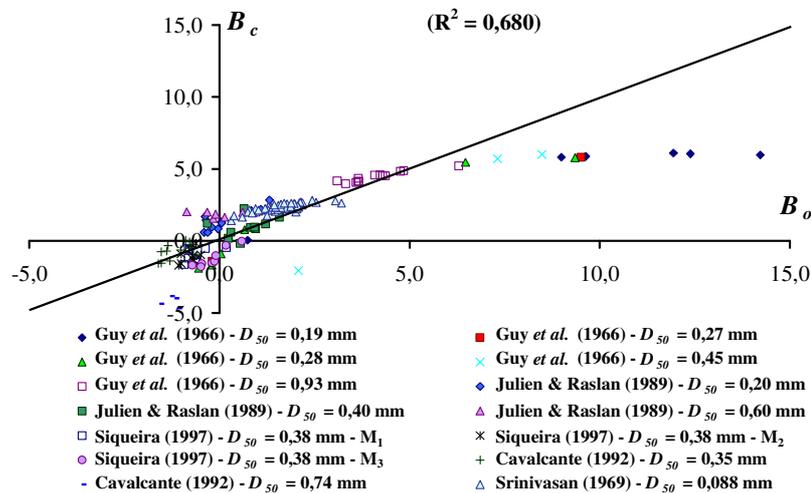


Figura B.53 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados – Canais de Laboratório excluindo os dados obtidos por Guy *et al.* (1966) no canal de 0,61m de largura com dois parâmetros.

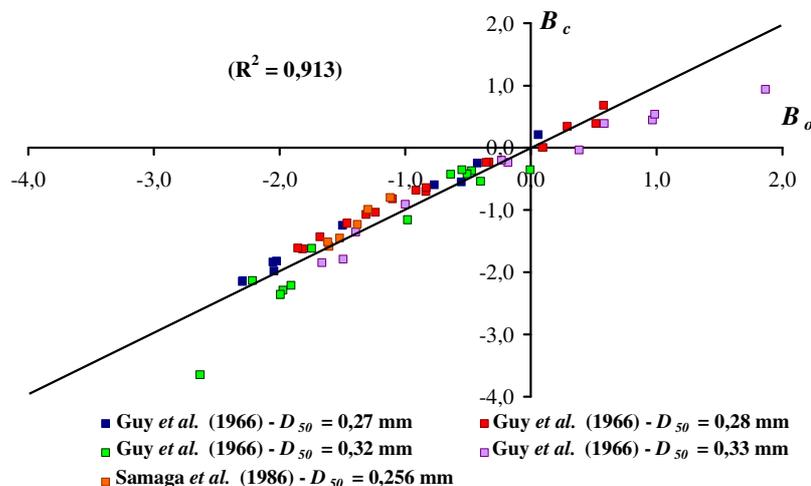


Figura B.54 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,30$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros.

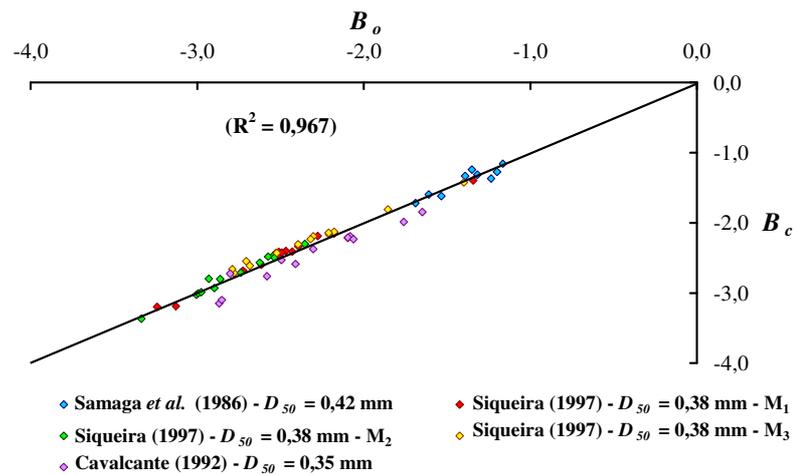


Figura B.55 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,40$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros.

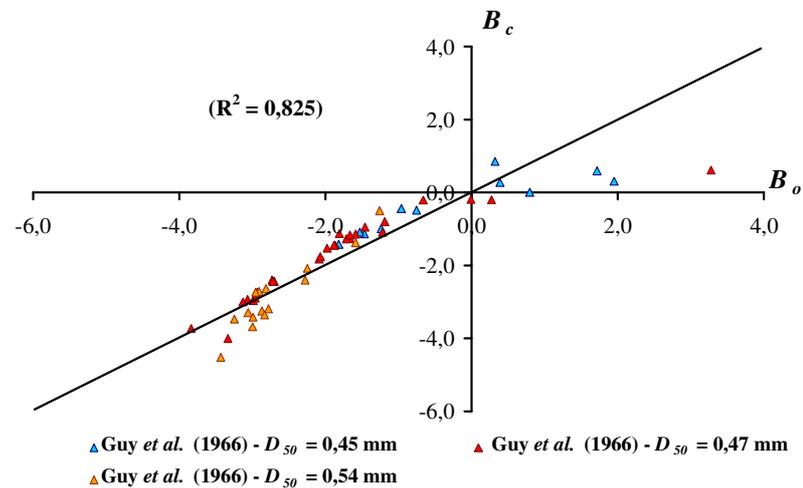


Figura B.56 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,50$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros.

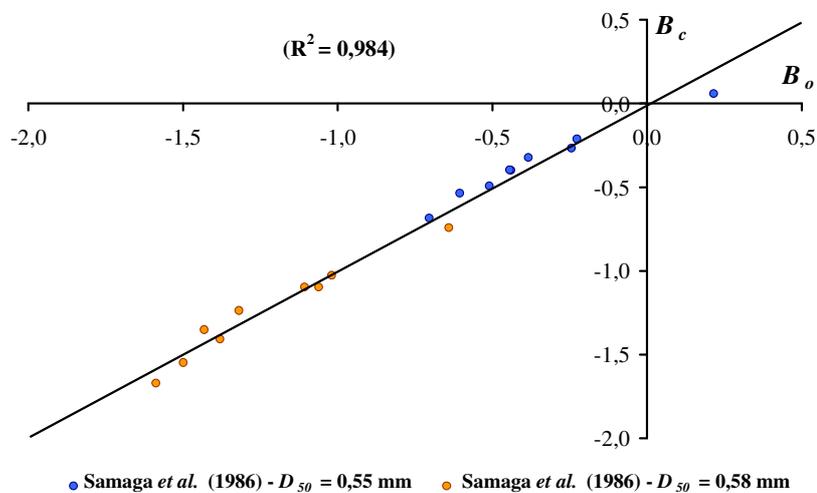


Figura B.57 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,60$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros.

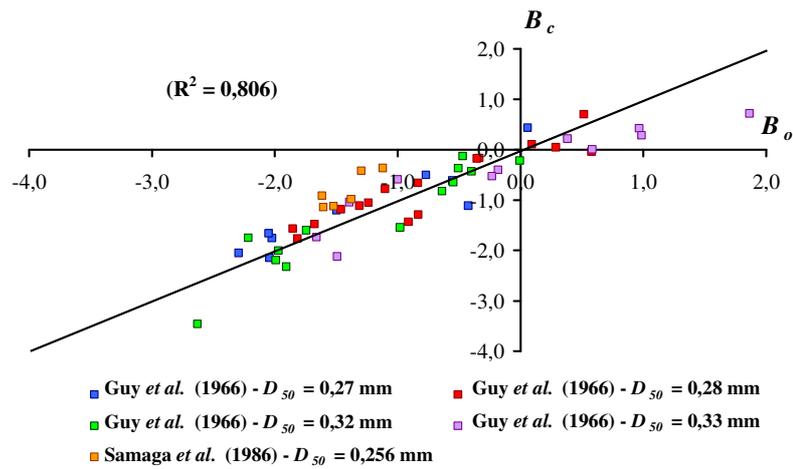


Figura B.58 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,30$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros.

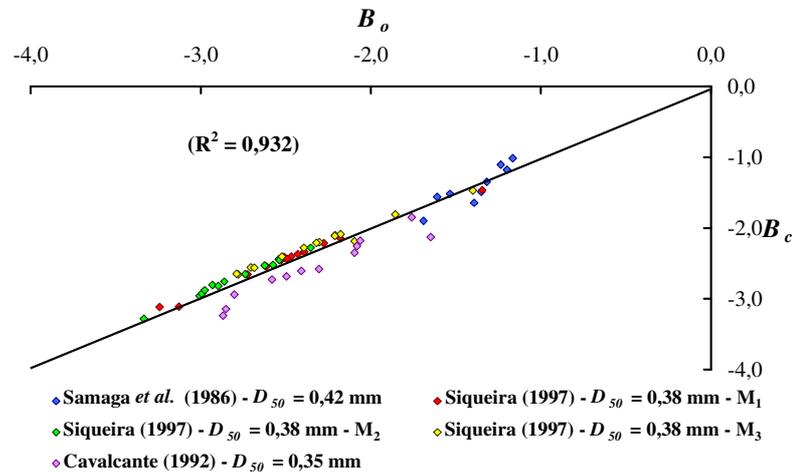


Figura B.59 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,40$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros.

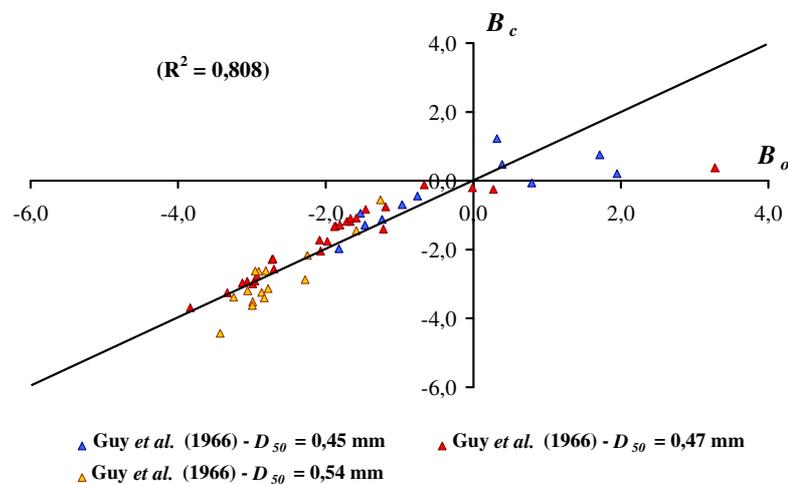


Figura B.60 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,50$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros.

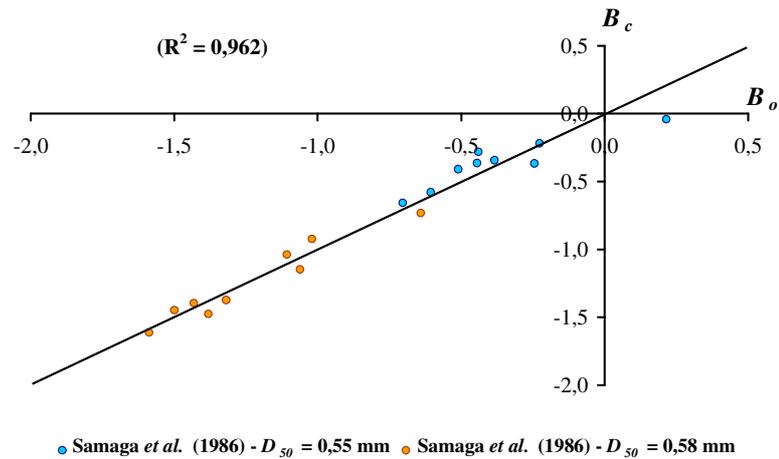


Figura B.61 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para dunas com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,60$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros.

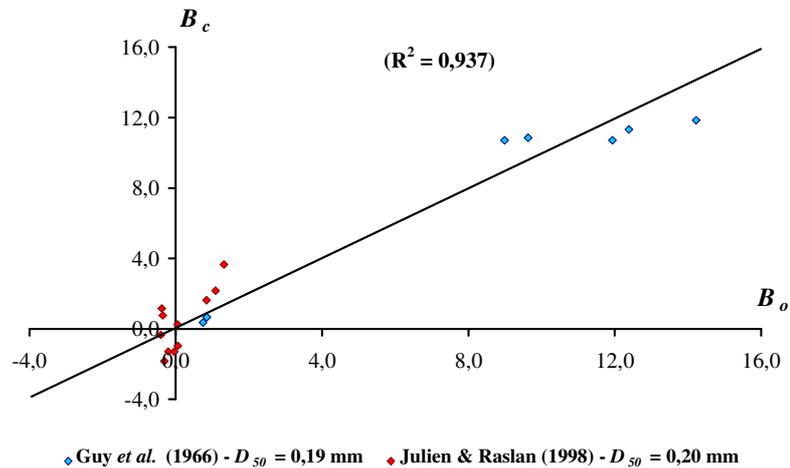


Figura B.62 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,20$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros.

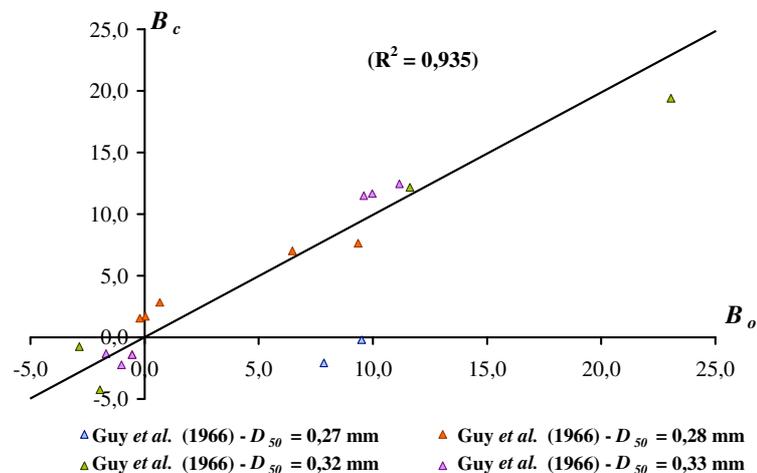


Figura B.63 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,30$ mm) – Canais de Laboratório com três parâmetros.

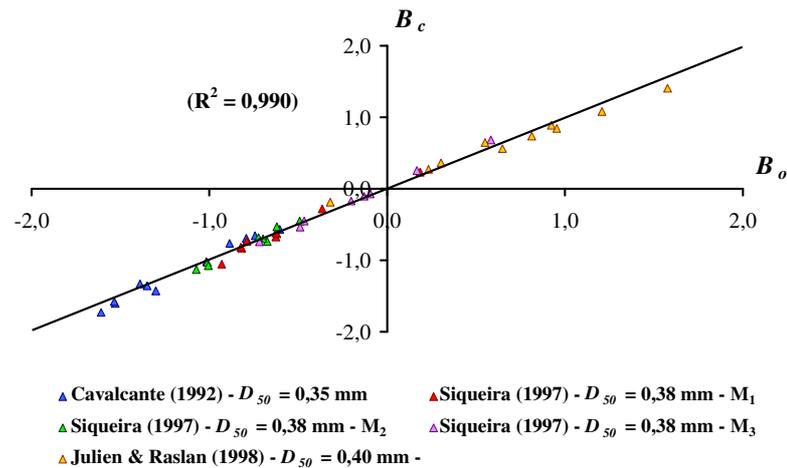


Figura B.64 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,40\text{mm}$) – Canais de Laboratório com três parâmetros.

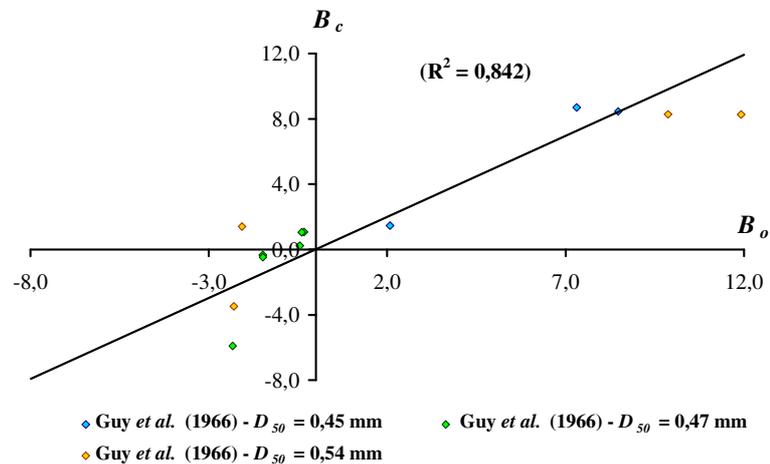


Figura B.65 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,50\text{mm}$) – Canais de Laboratório com três parâmetros.

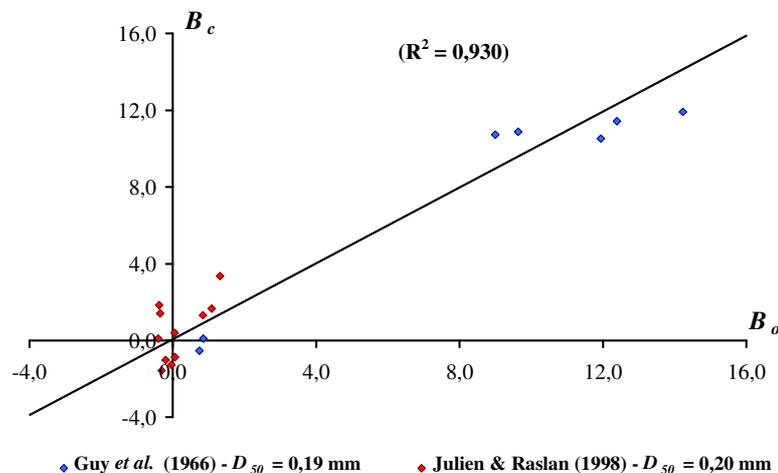


Figura B.66 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,20\text{mm}$) – Canais de Laboratório com dois parâmetros.

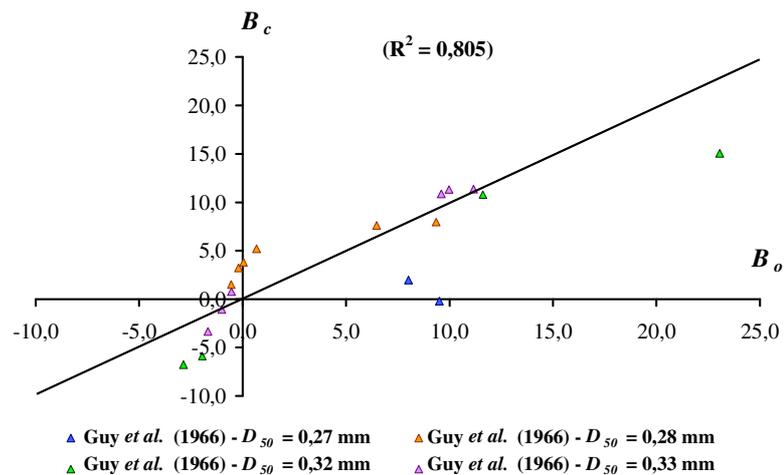


Figura B.67 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,30$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros.

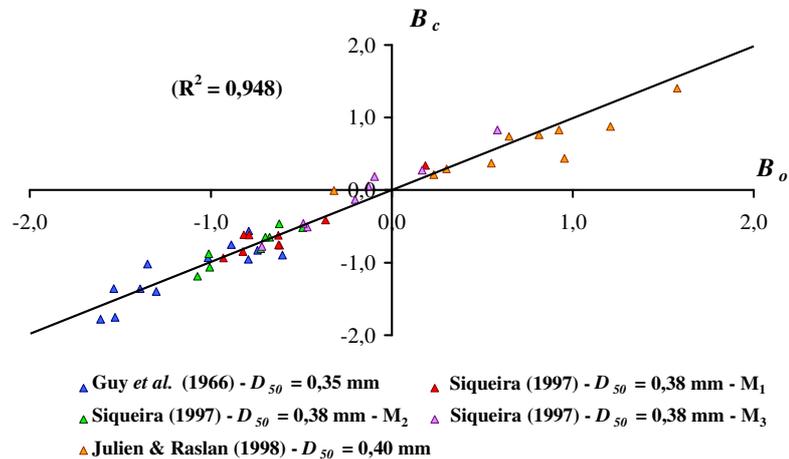


Figura B.68 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,40$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros.

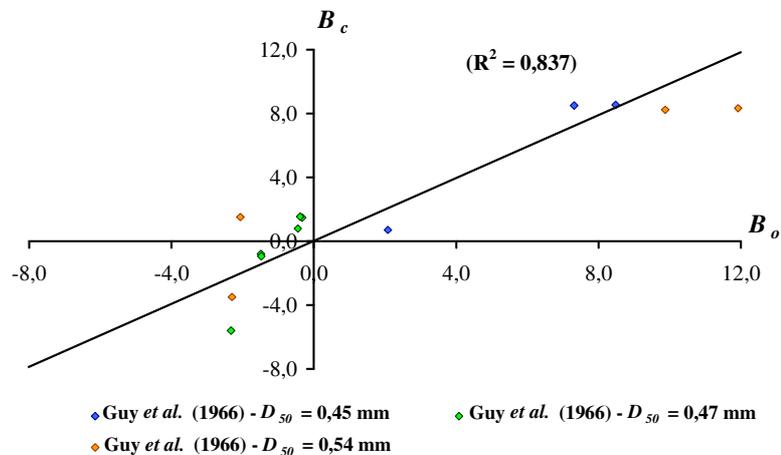


Figura B.69 – Gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros B_o e B_c para leito plano com dados agrupados por faixa de D_{50} ($D_{50} \cong 0,50$ mm) – Canais de Laboratório com dois parâmetros.