YANNICK VÁLIA ROMERO SUÁREZ

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM
CANAIS DE FUNDO FIXO**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Orientador:
Prof. Dr. Kikuo Tamada

**SÃO PAULO
2000**

FICHA CATALOGRÁFICA

Suárez, Yannick Vália Romero

Resistencia ao escoamento em canais de fundo fixo/
Y. V. R. Suárez - - São Paulo, 2001.
p. 95.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e
Sanitária.

1.Coefficiente de resistência 2.Resistência ao escoamento
3.Rios de montanha 4.Rugosidade de grande escala
I. Universidade de Sao Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Hidráulica e Sanitária. II.t.

Ao Eterno Amor
Dos Meus Anjos
Yenia e Andrea

A Minha Mãe
Exemplo de Fortaleza

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Kikuo Tamada, pela orientação e sugestões na elaboração do trabalho de dissertação.

Aos meus Professores ao longo do curso de mestrado muito especialmente ao Dr. Giorgio Brighetti , Dr. Podalyro A. De Sousa, Dr. Kokei Uehara e Dra. Monica F.A. Porto pelas valiosas aulas e estímulo.

Ao Governo Brasileiro pela concessão da bolsa CNPq/PEC-PG, sem a qual o curso e este trabalho não seriam possíveis.

Um agradecimento sincero e devido aos profissionais da área Manuel Escalante, Miguel Soto, Cesar Gonzales, Augusto Olivos, Carlos Herrera e Ada Arancibia no Peru, Delduque Palma Pinto, Noboru Minei e Loreto Trujillo no Brasil que gentilmente prestaram as informações solicitadas e pelo apoio.

Aos meus queridos Marcel Romero, Ilia Romero, Ingrid Romero, Yurac Romero e Maria Isabel Lo Fiego pela irradiação de amor e entusiasmo e pela ajuda constante que possibilitou a concretização da meta almejada.

A Contribuição de Carlos Vicente, Tatiana Vicente e Otto Pflucker foram inestimáveis na edição do texto.

Às minhas amigas Catherine C. Begazo, Ivone Barriga, Janet Seminario e Liliana Rodriguez pelo carinho e companheirismo.

À Elza, bibliotecária do CTH, pelo atendimento e colaboração.

À cultura do povo brasileiro pela contribuição na minha formação profissional e humana, um muito obrigado.

SUMARIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iv
Lista de Símbolos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
1. Introdução	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Justificativa	2
2. Revisão Bibliográfica	4
3. Escoamento Permanente e Uniforme em Canais de Fundo Fixo	27
3.1 Generalidades	27
3.2 Distribuição de Velocidade em Escoamento Uniforme Turbulento	29
3.3 Regiões do Escoamento e Rugosidade de Superfície	33
4. Resistência ao Escoamento em Canais	35
4.1 Avaliação Teórica da Resistência ao Escoamento	35
4.2 Resistência de Superfície e Resistência de Forma	37
4.3 Resistência ao Escoamento em Canais com Fundo Plano e Fixo	37
4.3.1 Fórmula de Manning	38
4.3.2 Fórmula de Chézy	39
4.3.3 Fórmula de Darcy - Weisbach	40
4.3.4 Equações Semilogarítmicas de Resistência ao Escoamento	41

4.3.5 Fórmulas do Tipo Monomial	42
5. Avaliação dos Efeitos da Distribuição Tamanho e Forma dos elementos de Rugosidade Artificial	43
5.1 Estudo em Modelo Físico Reduzido	45
5.2 Resultados	55
6. Resistência ao Escoamento em Rios de Montanha	56
6.1 Generalidades	56
6.2 Características do Escoamento	56
6.3 Escala de Rugosidade	57
6.4 Regimes do Escoamento	58
6.5 Fórmulas de Resistência ao Escoamento	61
7. Estudo da Resistência em Rios de Montanha	65
7.1 Generalidades	65
7.2 Análise dos Resultados	88
8. Conclusões e Sugestões	90
9. Referências Bibliográficas	92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Esquema dos três tipos básicos de escoamento sobre superfície rugosa: (a) escoamento em rugosidade isolada; (b) escoamento com ondas (b) de interferência; (c) escoamento quase - liso.	5
Figura 2.2 Esquema da distribuição dos elementos de rugosidade	6
Figura 2.3 Esquema dos seis tipos de arranjos dos elementos de rugosidade.	7
Figura 2.4 Variação do parâmetro de espaçamento ($\psi = \chi/a$), com a densidade da rugosidade ($ab/(x(e+b))$).	8
Figura 2.5 Comparação entre a resistência baseada na fórmula de Manning e na equação logarítmica.	9
Figura 2.6 Variação do coeficiente de resistência para valores de $4y_n/k < 12$	11
Figura 2.7 Coeficiente de resistência em função do número de Reynolds e do parâmetro de rugosidade θ	12
Figura 2.8 Deslocamento do coeficiente de resistência da lei logarítmica para grandes valores da rugosidade relativa.	15
Figura 2.9 Classificação dos escoamentos segundo Knight, D.W. e Macdonald, J.A.	18
Figura 2.10 Variação do coeficiente de resistência do leito com o espaçamento relativo para $y/B = 0,2$	19
Figura 2.11 Diagrama para o cálculo de $(8/f)^{1/2}$ em função de y/D_{84} para escoamentos uniformes	23
Figura 2.12 Esquema do escoamento proposto pelo Aguirre-Pe et al. (1986)	24
Figura 2.13 Relação entre o coeficiente C^* calculado (C_c), e o coeficiente C^* obtido em laboratório (C_e)	26
Figura 3.1 Diagrama do escoamento uniforme em canais abertos.	27
Figura 3.2 Distribuição vertical da velocidade num canal com escoamento turbulento.	29
Figura 3.3 Desenvolvimento da camada limite num canal com uma condição ideal de entrada.	33
Figura 5.1 Limites de integração	44
Figura 5.2 Esquema dos cinco tipos de arranjos dos elementos de rugosidade do modelo	46
Figura 5.3 Arranjo Tipo (B) para os testes 7 a 12 no modelo reduzido	47
Figura 5.4 Arranjo Tipo (C) para os testes 13 a 18 no modelo reduzido	48
Figura 5.5 Arranjo Tipo (E) para os testes 25 a 30 no modelo reduzido	49
Figura 5.6 Escoamento no modelo para o Arranjo Tipo (E)	50

Figura 5.7	Relação entre o Parâmetro de rugosidade (χ) e o Desvio padrão (σ) do perfil da rugosidade dos elementos do modelo	53
Figura 5.8	Relação entre o Parâmetro de Espaçamento da Rugosidade ($\Psi = \chi/a$) e a Densidade da Rugosidade ($ab/[x(e+b)]$)	54
Figura 6.1	Regiões no escoamento da camada limite	56
Figura 6.2	Escoamentos do tipo (a) rápido e (b) tranquilo em canal de laboratório	59
Figura 6.3	Escoamento do tipo “tumbling” em canal experimental	59
Figura 6.4	Variação do numero de Froude (F), em função da rugosidade relativa (k/y) e o espaçamento relativo (L).	60
Figura 7.1	Relação entre $(8/f)^{1/2}$ e a submersão relativa (R/D_{84})	76
Figura 7.2	Relação entre $(8/f)^{1/2}$ e a submersão relativa (y/D_{84})	77
Figura 7.3	Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Hey	78
Figura 7.4	Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Bathurst	78
Figura 7.5	Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Aguirre e Fuentes	79
Figura 7.6	Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Thompson e Campbell	79
Figura 7.7	Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Garcia	80
Figura 7.8	Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Ugarte e Mendez	80
Figura 7.9	Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. De Ajuste	81
Figura 7.10	Relação entre a função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Hey	82
Figura 7.11	Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Bathurst	82
Figura 7.12	Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Aguirre e Fuentes	83
Figura 7.13	Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Thompson e Campbell	83
Figura 7.14	Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade	

média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Garcia	84
Figura 7.15 Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Ugarte e Mendez	84
Figura 7.16 Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Ajuste.	85
Figura 7.17 Medições de velocidades no rio Sangaban (rio de montanha, Peru)	86
Figura 7.18 Escoamento do Rio Sangaban (Peru)	86
Figura 7.19 Rio Sangaban (Peru), aprecia-se os grandes elementos de rugosidade no leito	87
Figura 7.20 Rio Sangaban (Peru), escoamento no regime subcrítico	87

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 Comparação de valores observados e previstos de $(8/f)^{1/2}$, usando dados de rio	21
Tabela 5.1 Resumo das Medições no Modelo para cada Arranjo Testado. Os Valores do Parâmetro de Resistência χ foram obtidos pela Eq. 5.2, λ da Eq. 5.8 e o Numero de Elementos (N) da Eq. 5.3	51
Tabela 5.2 Resumo das Medições no Modelo para cada Arranjo Testado. Os Números de Elementos (N) foram pegados do esquema de arranjos (Figura 5.2). Os valores de λ foram obtidos da Eq. 5.3 , os do Parâmetro de Resistência χ da Eq. 5.2 e os de σ da Eq.5.6	52
Tabela 6.1 Equações de resistência ao escoamento para rugosidade de escala intermédia e grande	62
Tabela 6.2 Comparação de erros na estimativa da resistência ao escoamento feita pelo Aguirre Pe et al., usando equações de outros pesquisadores	64
Tabela 7.1 Dados de hidrométricos no rio Sangaban (Peru)	69
Tabela 7.2 Resultados dos cálculos com base ás equações de Hey, Bathurst e Thompson & Campbell para o rio Sangaban	70
Tabela 7.3 Resultados dos cálculos com base ás equações de Aguirre & Fuentes e Ugarte & Mendez para o rio Sangaban	72
Tabela 7.4 Resultados dos cálculos com base á equação de Garcia e a equação do Ajuste para o rio Sangaban	74
Tabela 7.5 Resultados do cálculo com do desvio médio absoluto (DMA) da equação (7.4) para rio Sangaban	89

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
A_w	Área da projeção da rugosidade normal ao escoamento
B	Largura do canal
b	Comprimento do elemento
C	Coefficiente de Chézy
C_D	Coefficiente de arrasto
C^*	Coefficiente adimensional de Chézy,
C_0^*	Coefficiente adimensional de Chézy para o escoamento sem o efeito de esteira
C_n	Constante de integração
d	Profundidade do escoamento medido desde o topo do elemento de rugosidade
D	Diâmetro característico do material do leito
D_n	Diâmetro do elemento da rugosidade maior ou igual ao n% dos diâmetros da amostra
e	Espaçamento transversal entre elementos.
f	Fator de resistência de Darcy-Weisbach
F_s	Força de infiltração no leito do canal
g	Aceleração da gravidade
h_f	Perda por atrito associado aos condutos forçados
i	Declividade do canal
k	Altura da rugosidade
k_s	Diâmetro do grão de areia de Nikuradse
L	Espaçamento entre elementos
L_R	Escala longitudinal
n	Coefficiente de Manning
n_P	Coefficiente de Manning do protótipo
n_m	Coefficiente de Manning do modelo
n_R	Escala de rugosidade
N	Número de elementos no leito
P	Perímetro Molhado
Q	Vazão do escoamento
R	Raio hidráulico
R^2	Coefficiente de Determinação
$\mathcal{R}$	Número de Reynolds = UR/v
$\mathcal{R}_w$	Número de Reynolds da partícula (relacionado à velocidade de queda) = wD/v
$\mathcal{R}_*$	Número de Reynolds do grão

S_c	Fator de forma da seção transversal do canal
S_p	Fator de forma da partícula
S_R	Fator de forma da extensão do canal
u	Velocidade
u_*	Velocidade de atrito
U	Velocidade média
U_*	Velocidade média de atrito
w	Velocidade de queda de uma partícula
x	Espaçamento longitudinal
y	Profundidade do escoamento
y_n	Profundidade normal do escoamento
y'	Profundidade do escoamento medida desde o fundo plano do canal até a superfície da água
α	Fator relacionado ao diâmetro do grão de areia de Nikuradse
β	Fator de esteira.
χ	Parâmetro geral da rugosidade
δ	Espessura da subcamada viscosa
γ	Peso específico da água
γ_s	Peso específico da partícula submersa
κ	Constante de von Kármán
λ	Concentração dos elementos
μ	Coeficiente de viscosidade dinâmica
ν	Coeficiente de viscosidade cinemática
θ	Parâmetro de rugosidade θ definido por Herbich, J.B. e Shulits, S.
ρ	Massa específica do fluido
ρ_s	Massa específica do sedimento
σ	Desvio padrão do perfil de rugosidade
σ'	Desvio padrão da distribuição do tamanho do material do leito definido pelo Bathurst
τ_0	Tensão de cisalhamento junto ao leito
τ	Tensão de cisalhamento a uma profundidade y
ψ	Parâmetro de espaçamento
D/y	Rugosidade relativa em função do diâmetro do elemento de rugosidade
k/y	Rugosidade relativa em função da altura de rugosidade
y/D_{84}	Submersão relativa em função da profundidade do escoamento
R/D_{84}	Submersão relativa em função do raio hidráulico

RESUMO

O problema da previsão da resistência ao escoamento em canais tem atraído a atenção dos engenheiros há longo tempo. Durante os últimos decênios a resistência ao escoamento em canais abertos de fundo fixo tem sido amplamente investigada, usando rugosidade artificial nas superfícies de canais experimentais. A adoção do coeficiente de rugosidade para um canal natural significa estimar a resistência de este ao escoamento. A utilização de um valor incorreto deste coeficiente pode ter grandes impactos na estimação da vazão e em consequência no dimensionamento dos projetos de obras hidráulicas.

Apresenta-se, mediante pesquisa bibliográfica, os métodos de cálculo para avaliação do coeficiente de rugosidade ou coeficiente de resistência, dando ênfase a aqueles desenvolvidos para canais naturais com rugosidade de grande escala, sem os efeitos do transporte de sedimentos. Em modelo físico avaliam-se os efeitos da distribuição, tamanho e forma dos elementos geométricos na resistência ao escoamento.

Espera-se que os resultados da pesquisa proporcionem ao engenheiro os critérios necessários para a avaliação do coeficiente de rugosidade.

Os métodos diretos de medição de vazões nos rios nem sempre podem ser levados a cabo em rios de montanha, especialmente na época de cheia, devido às grandes declividades ($i \geq 1\%$), material de grandes dimensões no leito (pedras, seixos, matacões), submersão relativa menor do que 1, condições estas de escoamento que podem ser perigosas para os equipamentos de medição. Em tais circunstâncias é necessário o uso de métodos indiretos. A aplicação das relações de resistência ao escoamento em rios de montanha torna-se difícil pelos escassos conhecimentos na avaliação do coeficiente de resistência. Faz-se uma comparação das diferentes formulações existentes da resistência ao escoamento com dados de um rio dos Andes peruanos, determinando-se uma equação de ajuste.

ABSTRACT

The flow resistance estimation problem in channels has attracted the engineer's attention for a long time. During the last decades the flow resistance in open channels with rigid bed has been research with the use of artificial roughness in bed flumes. Adapting a natural channel roughness coefficient means the estimation of the corresponding resistance to flow. The use of an incorrect value in this coefficient might produce a big impact in the discharge estimation, as well as in the hydraulic work project

The calculation methods to estimate the roughness coefficient or resistance coefficient are showed through this bibliographic research, attaching importance to those developed for channels with large scale roughness; this without the sediment transport effects into account. The distribution, size and shape effects of the geometric elements in the flow resistance are evaluated in a physical model.

It is expected that the research results provide the engineer with the required criteria to estimate the roughness coefficient.

The direct methods of the discharge measurement in rivers can not always take place in mountain rivers, owing to the following reasons: high gradients ($i \geq 1\%$), big dimension material (cobbles and boulders), relative submergence lower than unit; flow conditions that might be dangerous for the measuring equipment. Under these circumstances it is necessary the use of indirect methods. The application of flow resistance relations in mountain rivers turns very difficult, due to the limited knowledge in resistance coefficient evaluation. In the following research has been made a comparison of the different existing flow resistance equations in mountain rivers, for a river in the Peruvian Andes by establishing a fitting curve.

INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

A engenharia hidráulica é baseada na maioria dos casos na experimentação em laboratório, como um apoio direto e indispensável para a elaboração de projetos de obras hidráulicas. Os testes em modelos físicos são uma boa aproximação, apesar de não se conseguir uma precisão rigorosa; porém consegue-se uma precisão necessária para os objetivos práticos.

O problema da previsão da resistência ao escoamento em canais tem atraído a atenção dos engenheiros há longo tempo. Durante os últimos decênios a resistência ao escoamento em canais abertos de fundo fixo tem sido amplamente investigada, usando rugosidade artificial nas superfícies de canais experimentais.

A adoção do coeficiente de rugosidade para um canal natural significa estimar a resistência de este ao escoamento. A utilização de um valor incorreto deste coeficiente pode ter grandes impactos na estimação da descarga e em consequência no dimensionamento dos projetos de obras hidráulicas.

1.2 OBJETIVOS

Apresentar, mediante pesquisa bibliográfica, os métodos de cálculo para avaliação do coeficiente de rugosidade ou coeficiente de resistência, dando ênfase a aqueles desenvolvidos para canais naturais com rugosidade de grande escala, sem os efeitos do transporte de sedimentos.

Avaliação dos efeitos da distribuição e tamanho de elementos geométricos fixados em canal artificial na resistência ao escoamento.

Espera-se que os resultados da pesquisa proporcionem ao engenheiro os critérios necessários para a avaliação do coeficiente de rugosidade.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os canais com leito de pedra, com rugosidade de grande escala, para o qual o tamanho do material do leito é de igual ordem de magnitude da profundidade do escoamento, têm recebido relativamente pouca atenção comparada com canais com material de leito fino.

Com o avanço do desenvolvimento de regiões montanhosas, especialmente em países menos industrializados, estes canais estão começando a ser ressaltados em projetos de engenharia.

Os métodos diretos de medição de vazões nos rios nem sempre podem ser levados a cabo em rios de montanha, especialmente na época de cheia, devido às grandes declividades ($i \geq 1\%$), material de grandes dimensões no leito (pedras, seixos, matacões) e ocorrendo casos em que a relação entre profundidade e o tamanho do material pode ser menor do que 1, condições estas de escoamento que podem ser perigosas para os equipamentos de medição. Em tais circunstâncias é necessário o uso de métodos indiretos (equações de Darcy-Weisbach ou Manning) para o cálculo da vazão. Porém, a aplicação das relações de resistência ao escoamento em rios de montanha torna-se difícil pelos escassos conhecimentos na avaliação do coeficiente de resistência.

O uso dos elementos rugosos no projeto hidráulico, pode melhorar o desempenho e a economia de algumas estruturas. Podem-se mencionar os seguintes:

- Em alguns tipos de dissipadores de energia.
- Para controlar a velocidade de escoamento, quando se faz necessária a utilização de canais de alta declividade.
- O uso de elementos de rugosidade induz maior turbulência aumentando a capacidade de transporte de sedimento.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos apresentados de maneira cronológica nesta revisão, ressaltam alguns dos aportes teóricos e resultados práticos de vários investigadores, para um melhor entendimento dos processos envolvidos na resistência ao escoamento e avaliação do seus coeficientes.

Segundo **Einstein, A. H e Barbarossa, N. (1952)**, a solução do problema para a avaliação da perda por atrito em canais naturais usualmente depende do juízo e a experiência do engenheiro.

A mecânica de fluidos ensina que para uma parede hidrodinamicamente lisa, as forças de cisalhamento são transmitidas integralmente por tensões tangenciais de cisalhamento dentro do fluido, enquanto que em uma parede hidrodinamicamente rugosa, parte das forças de cisalhamento são transmitidas por tensões de cisalhamento normais, distribuídas assimetricamente sobre rugosidades individuais sobressaindo da parede. Neste ultimo caso, o grau de resistência ao escoamento depende fundamentalmente do tamanho, forma e espaçamento da irregularidade individual. Este tipo de resistência é denominado resistência de forma.

Morris, H. M. (1955), apresentou um novo conceito de escoamento sobre superfícies rugosas. O conceito foi baseado particularmente no efeito do espaçamento longitudinal dos elementos rugosos e dos escoamentos vorticosos. Três tipos de escoamentos básicos foram determinados: escoamento em rugosidade isolada, escoamento com ondas de interferência e escoamento quase - liso (figura 2.1). Para tais modelos de escoamento foram derivadas suas respectivas equações com dados obtidos

mediante experiências de laboratório para condutos forçados e canais com diversos tipos de rugosidade.

Figura 2.1 Esquema dos três tipos básicos de escoamento sobre superfície rugosa: (a) escoamento em rugosidade isolada; (b) escoamento com ondas de interferência; (c) escoamento quase - liso.

Segundo Sayre, W.W. e Albertson, M. L. (1963), tem sido desenvolvidas fórmulas de rugosidade empíricas, sendo a maioria delas baseadas na fórmula de Chézy :

$$U = C\sqrt{Ri} \quad (2.1)$$

As fórmulas desenvolvidas por Manning, Ganguillet e Kutter, Bazin e outros; relacionam o coeficiente C à rugosidade da superfície. Estas fórmulas tem pouco fundamento teórico e fornecem resultados apropriados só sob uma faixa estreita de

condições de escoamento para as quais elas foram desenvolvidas. Experiências de Sayre, A. R. Robinson, e Sayre e Albertson, mostram que os coeficientes de rugosidade nestas fórmulas nem sempre permanecem constantes para uma rugosidade de superfície em particular.

O desenvolvimento da teoria da camada limite tem facilitado o entendimento de alguns fenômenos de escoamentos envolvendo a rugosidade de superfície.

A aplicação feita por Keulegan e outros da rugosidade equivalente de Nikuradse para canais abertos teve bom sucesso na descrição da rugosidade tipo grão em canais abertos e largos. Porém, mostrou-se inadequado para descrever alguns tipos de rugosidades onde o espaçamento relativo em adição ao tamanho relativo dos elementos de rugosidade são características importantes da parede.

Foi desenvolvida uma série de experimentos para determinar o efeito do espaçamento da rugosidade em canal aberto. Os experimentos foram conduzidos num canal experimental de declividade variável de 2,4 m de largura e 21,6 m de comprimento. Os testes foram realizados para declividades de 0,001 e 0,003 m/m, e descargas de $0,056 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0,162 \text{ m}^3/\text{s}$. Os elementos geométricos artificiais caracterizando a rugosidade foram placas de metal de 15,24 cm de largura e 3,81 cm de altura distribuídas no fundo do canal com espaçamentos transversais e longitudinais (figura 2.2).

Figura 2.2 Esquema da distribuição dos elementos de rugosidade.

Os dados foram analisados em termos dos conceitos de von Kármán-Prandtl para o escoamento perto de superfície rugosa. Foram desenvolvidas fórmulas logarítmicas de escoamento onde o coeficiente de rugosidade foi relacionado ao tamanho e as características do espaçamento dos elementos de rugosidade.

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 6.06 \log \frac{y_n}{k} + C_2 \quad (2.2)$$

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 6.06 \log \frac{y_n}{\chi} \quad (2.3)$$

As equações (2.2) e (2.3) mostraram-se aplicáveis para um limite de condições dentro dos seis arranjos dos elementos de rugosidades testados (figura 2.3).

Figura 2.3 Esquema dos seis tipos de arranjos dos elementos de rugosidade.

Nestas equações, a constante C_2 depende do espaçamento relativo dos elementos de rugosidade de altura k . O parâmetro geral de rugosidade χ é uma função do tamanho relativo e do espaçamento relativo dos elementos.

Os resultados experimentais foram comparados com os resultados de vários investigadores (figura 2.4). A equação (2.2) mostrou ser mais adequada do que a fórmula de Manning para o limite de rugosidade e escoamento testado (figura 2.5).

Figura 2.4 Variação do parâmetro de espaçamento ($\psi = \chi/a$), com a densidade da rugosidade ($ab/(x(e+b))$).

Na figura (2.2), o parâmetro da densidade dos elementos rugosos $ab/x(e+b)$ é numericamente igual à relação entre a área projetada dos elementos na direção do

escoamento e a área total do leito do canal. Sendo; a a altura e b o comprimento do elemento, x o espaçamento longitudinal e e o espaçamento transversal entre elementos. O parâmetro de espaçamento $\psi = x/a$ incrementa-se com o aumento da densidade da rugosidade.

Figura 2.5 Comparação entre a resistência baseada na fórmula de Manning e na equação logarítmica.

Mirajgaoker, A. M. e Charlu, K. L. N. (1963), realizaram estudos em canal experimental para avaliar os efeitos das grandes rugosidades em escoamentos de canais naturais. Foram usadas pedras naturais de 6,35 cm a 7,62 cm de diâmetro para criar as condições de escoamentos naturais com matações. A largura do canal experimental de fundo fixo foi de 0,914 m e foram testados 6 arranjos de elementos de rugosidade com densidade de 15 a 114 pedras por $0,836 \text{ m}^2$. Os arranjos foram similares aos usados por W.W. Sayre e M.L. Albertson [5], e a declividade do canal foi fixada em 0.0053 m/m.

Mostraram a variação de $C/g^{1/2}$ com a rugosidade relativa baseada no parâmetro y_n/χ . Todos os dados se aproximaram a uma reta de forma similar à da equação (2.3).

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 5.28 \log \frac{y_n}{\chi} + 1.72 \quad (2.4)$$

A presença da constante 1,72 poderia ser devido ao fato de que os estudos descreveram as condições com matações. Os resultados indicaram que a constante C_2 na equação (2.2) variava entre 1,36 a 4,12 para as diversas densidades de elementos de rugosidade.

O'Loughlin, E.M. e Macdonald, E.G. (1964), testaram uma equação obtida da equação da lei logarítmica de distribuição de velocidades:

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + C_1 \quad (2.5)$$

Integrando esta equação sobre a profundidade do escoamento:

para $C_1 = 8.5$ segundo experiência de Nikuradse

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{0,81}{\kappa} \lg \left(\frac{4y_n}{k} \right) \quad (2.6)$$

Sendo:

y_n : profundidade normal do escoamento

f : fator de resistência de Darcy-Weisbach

κ : constante de Von Kármán

Mostraram que para valores $4y_n/k < 12$ (rugosidade relativa $k/y_n > 0,3$), existe um marcado deslocamento da função usual logarítmica de resistência. Para valores pequenos de $4y_n/k$ o coeficiente de resistência $1/f^{1/2}$ aparentemente decresce rapidamente (figura 2.6).

Figura 2.6 Variação do coeficiente de resistência para valores de $4y_n/k < 12$

Segundo **Herbich, J.B. e Shulits, S. (1964)**, quando o tamanho da rugosidade é múltiplo da espessura da camada limite ou aflorando através da superfície da água, pode-se afirmar que a camada limite é desprezível em relação à dimensão da rugosidade. A distribuição da velocidade seria complexa e então a lei logarítmica de velocidades não seria válida. Com o objetivo de obter um método prático para determinar as profundidades das correntes com leito coberto com matacões foram avaliados os dados experimentais em um canal contendo elementos cúbicos como rugosidade artificial para escoamento fluvial. Foi usada a fórmula de Manning e seu coeficiente foi relacionado ao número de Reynolds, número de Froude e o parâmetro de rugosidade θ , como apresentado na figura (2.7), sendo θ a relação entre a área projetada dos elementos rugosos na direção do escoamento e a área horizontal do canal. O estudo foi limitado para escoamento fluvial e declividades entre 0,003 e 0,03 m/m.

Figura 2.7

Coefficiente de resistência em função do número de Reynolds e do parâmetro de rugosidade θ

Segundo Ben-Chie Yen, (1965), sendo k a altura da rugosidade e δ a espessura da subcamada viscosa tem-se o seguinte:

1. Quando $k \ll \delta$, o fluido escoa sobre uma superfície hidraulicamente lisa e as equações descrevendo o escoamento são bem conhecidas. A perda de energia ocorre como resultado da tensão de cisalhamento na superfície.
2. Quando k é da ordem de δ , o fluido escoa sobre uma superfície rugosa. A perda de energia do escoamento neste caso é principalmente devido ao trabalho oferecido para vencer a resistência de superfície. Os casos 1 e 2 não dependem do número de Froude.

3. Quando k é da ordem ou de magnitude maior que δ mas menor que a profundidade do escoamento, isto é, os elementos estão totalmente submersos, todos os parâmetros relacionados são importantes. Para **baixas concentrações**, os elementos de rugosidade atuam como obstáculos isolados, as contribuições da superfície, da forma, e das ondas na resistência total ao escoamento podem ser de importância, enquanto que **os efeitos de distribuição dos elementos é significativa**. Para **concentrações médias** a resistência de superfície é relativamente pequena comparada às **resistências devido à forma e às ondas**. Para **grandes concentrações**, o **atrito do escoamento sobre os elementos** poderia contribuir de maneira significativa à resistência total.

4. Se k é bem maior do que a profundidade do escoamento, os elementos atuam como pilares. As perdas de energia do escoamento são devidas principalmente à **resistência de forma e ondas**, a menos que a **concentração** seja **baixa**, neste caso a **resistência de superfície poderia ser predominante**. Para médias e baixas concentrações, todos os parâmetros relacionados são importantes.

Segundo **Ranga Raju, K.G. e Garde R.J, (1970)**, para o escoamento em superfície com pequenos elementos de rugosidade, a distribuição de velocidade na região turbulenta é logarítmica para paredes lisas, rugosas e de transição. Porém, tem sido notado desvios na distribuição logarítmica de velocidade de escoamentos em superfície com elementos de grandes dimensões.

Os experimentos foram conduzidos para avaliar os efeitos da rugosidade individual. Foram utilizados elementos contínuos (faixas) de metal de seção triangular de 2,0 cm e 4,0 cm fixadas no leito do canal experimental de 47,2 cm de largura, 60 cm de profundidade e 11 m de comprimento. A distribuição de velocidade foi medida com um tubo de Prandtl. O espaçamento relativo dos elementos L/k (sendo L o espaçamento entre elementos e k a altura do elemento) foi variado de 2,5 a 40, para declividades do canal de 0,00075 e 0,002875 m/m, e altura de água entre 10 cm e 33 cm.

A resistência total em superfícies com elementos de rugosidade para os valores de L/k estudados e com baixo número de Froude poderia ser avaliada assumindo que a resistência total é igual à resistência de forma dos elementos de rugosidade. A tensão de cisalhamento foi igualada à resistência de forma do elemento rugoso, desde que outros tipos de resistência foram assumidos desprezíveis. Então:

$$\frac{U}{U_*} = \sqrt{\frac{2}{k/L}} \sqrt{\frac{1}{C_D}} \quad (2.7)$$

Foi desenvolvida a equação empírica seguinte :

$$\frac{1}{\sqrt{C_D}} = C_1 \log \frac{y}{k} + C_2 \quad (2.8)$$

Sendo C_D o coeficiente de arrasto , C_1 e C_2 são função de L/k . A comparação desta equação com a equação convencional de resistência (2.2), mostra que para valores de $L/k < 5$ a equação (2.7) fornece melhores aproximações.

A aplicação do método sugerido por Morris [2] para estimar a resistência de uma série de elementos do tipo usado neste estudo revela que o método não é de confiança para uma ampla extensão de espaçamento relativo.

Bayazit, M. (1976), a partir do estudo experimental desenvolvido para avaliar as características da superfície livre do escoamento sobre rugosidades semi - esféricas , obteve resultados similares aos obtidos por O'Loughlin e Macdonald [7], equação (2.6), para valores de rugosidade relativa $k/y > 0,3$, sugerindo a equação de regressão linear :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0,85 \ln \frac{y_n}{k} + 0,74 \quad (2.9)$$

Com um coeficiente de correlação de 0,989. O acréscimo do coeficiente de resistência (figura 2.8), é devido ao fato de que a distribuição logarítmica de velocidades como dada na equação (2.6), não é mais valida na região próxima aos elementos rugosos, os quais cobrem uma substancial parte da profundidades do escoamento para grandes valores de rugosidade relativa.

Figura 2.8 Deslocamento do coeficiente de resistência da lei logarítmica para grandes valores da rugosidade relativa.

Bathurst, J.C. (1978), desenvolveu um estudo para descrever a resistência ao escoamento de rios com rugosidade de grande escala, no qual o tamanho do sedimento é da ordem da profundidade. Apresentou uma teoria básica usando dados dos rios testados, servindo de idéia para uma melhor avaliação.

Baseou-se no estudo desenvolvido por Judd e Petterson [11] os que mostraram a resistência como uma função da forma do canal (caracterizada pela relação largura - profundidade), do espaçamento da rugosidade λ (relação da área frontal de um elemento com a área do leito por elemento) e da rugosidade relativa (altura de rugosidade dada por D_{50}) :

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = \frac{U}{(gRi)^{1/2}} = f_n(\lambda) \left(\frac{\bar{y}}{B}\right)^{7(\lambda-0,08)} \left(\frac{\bar{y}}{D_{50}}\right)^{1/3} \quad (2.10)$$

Esta equação abrange alguns rios com determinadas características, mas teve uma desvantagem devido ao fato de que a função do espaçamento foi derivada de um gráfico empírico com significativa dispersão.

Para números de Reynolds ($10^4 < UD_{84}/\nu < 10^6$) observados nestes rios, a resistência de forma é importante. Usando a mesma análise de [13], o estudo desenvolveu as seguintes equações:

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = \frac{U}{(g\bar{y}i)^{1/2}} = \left[\frac{1}{\frac{1}{2}C_D\lambda_1\left(\frac{U_o}{U}\right)^2} \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

$$\lambda_1 = 0,139 \log\left(1,91 \frac{D_{84}}{R}\right) \quad (2.12)$$

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = \frac{U}{(gRi)^{1/2}} = \left(\frac{R}{0,365D_{84}}\right)^{2,34} \left(\frac{B}{\bar{y}}\right)^{7(\lambda_1-0,08)} \quad (2.13)$$

Os escoamentos nos rios testados foram principalmente os do tipo “tumbling flow” segundo classificação feita por Peterson e Mohanty [4].

A teoria admite que a resistência ao escoamento em condições de rugosidade de grande tamanho depende principalmente da geometria da rugosidade e varia com a geometria do canal só na medida em que seus parâmetros atuam no arrasto do elemento de rugosidade.

Thompson, S.M e Campbell, P.L. (1979), propuseram um fator de correção para a equação (2.14) de resistência ao escoamento para canal retangular largo (derivada da experiência de Nikuradse). A equação (2.15) com $k_s = 4.5 D$, foi sugerida para canais naturais largos e de grande rugosidade ($D/y \geq 0,3$), sendo D o diâmetro do material do leito e k_s o diâmetro do grão de areia de Nikuradse.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(12 \frac{R}{k_s} \right) \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[1 - 0,1 \frac{k_s}{R} \right] 2 \log \left(12 \frac{R}{k_s} \right) \quad (2.15)$$

Knight, D.W. e Macdonald, J.A. (1979), desenvolveram um estudo para descrever a rugosidade usando elementos contínuos (faixas) de seção quadrada com altura $k = 3,00$ mm, fixadas em intervalos regulares transversalmente na seção do canal experimental de 15,25 m de comprimento, 46 cm de largura e 38 cm de profundidade. As experiências foram realizadas para vazões de 20 l/s a 80 l/s; uma declividade de $0,958 \times 10^{-3}$ m/m mantida constante, espaçamentos (L) entre faixas de 1 m, 50 cm, 25 cm, 12,5 cm, 6,25 cm, 4,17 cm, 3,12 cm, 2,08 cm, 1,56 cm, e 1,04 cm para cada teste e para pequena rugosidade relativa (k/y entre 0,097 e 0,0097).

Foi feita uma ampliação da classificação dos escoamentos proposta originalmente por Morris [2], baseada no espaçamento relativo L/k :

Escoamento turbulento liso ($L/k = \infty$)

Escoamento turbulento semi - liso ($L/k = 333$ a $13,9$)

Escoamento hiperturbulento não uniforme ($L/k = 10,4$)

Escoamento hiper turbulento uniforme ($L/k = 6,94$)

Escoamento semi - quase - liso ($L/k = 5,21$)

Escoamento quase - liso ($L/k = 3,47$)

Figura 2.9 Classificação dos escoamentos segundo Knight, D. e Macdonald, J.

Eles confirmaram a equação (2.3) proposta por Sayre e Albertson [5] para uma ampla extensão de condições usando os dados de Sayre e Albertson [5], Raju e Garde [13] e outros investigadores. A máxima resistência do leito foi obtida para valores de L/k próximos de 8 e $y/B = 0,2$ (B é a largura do canal). Figura (2.9).

Figura 2.10 Variação do coeficiente de resistência do leito com o espaçamento relativo, para $y/B = 0,2$

Bathurst, J.C., Li, R., e Simons, D.B. (1981), desenvolveram um estudo tentando obter uma teoria de resistência ao escoamento para canais com rugosidade de grande escala, a partir de dados obtidos experimentalmente em laboratório.

Baseados nos estudos de [8], [18], [20] e outros, analisaram separadamente os processos de mecânica dos fluidos relacionados ao número de Reynolds e número de Froude que determinam o arrasto do elemento individual, e os efeitos da geometria da rugosidade e geometria do canal que determinam os efeitos conjuntos dos elementos no escoamento.

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = \frac{U}{(gRi)^{1/2}} = f_n(\mathcal{R}) \times f_n(F) \times f_n(\lambda_e) \times f_n\left(\frac{A_w}{By'}\right) \quad (2.16)$$

Equação de resistência:

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = \frac{U}{\left(g Ri\right)^{1/2}} = \left(\frac{0,28}{b} F\right)^{\log\left(0,755/b\right)} \times \left[13,434 \left(\frac{B}{Y_{50}}\right)^{0,492} b^{1,024(B/Y_{50})^{0,118}}\right] \times \left(\frac{A_w}{By'}\right) \quad (2.17)$$

Sendo:

A_w : área da projeção da rugosidade normal ao escoamento

B : largura do canal

y' : profundidade do escoamento medida desde o fundo plano do canal até a superfície da água

$Y_{50} = (L_{50} + D_{50})/2$

A_w/By' : área relativa de rugosidade

b : função da concentração da rugosidade efetiva (λ_e)

A equação (2.17) desenvolvida pelo estudo foi estabelecida para escoamento uniforme sobre leitos de rugosidade estreitamente fechada com distribuição de tamanho não uniforme, sem vegetação, sem os efeitos de transporte de sedimentos e para as seguintes condições:

$$0,1 < b < 1,0$$

$$13 < B/y < 153$$

$$0,19 < F < 1,93$$

$$10^3 < \Re < 4,4 \times 10^4$$

$$0,047 < \sigma < 0,187$$

Sendo σ o desvio padrão da distribuição do tamanho do elemento ($\sigma = \log (D_{84}/D_{50})$) e $\Re$ geralmente menores que os encontrados em rios naturais.

O experimento foi desenvolvido em um canal de 9,54 m de comprimento, 1,168 m de largura, declividades de 0,02, 0,05, e 0,08 m/m para vazões variando entre 0,00143 a 0,07197 m³/s, sendo utilizados seixos como elemento de rugosidade de 12,7,

19,05, 38,1 e 63,5 mm. Para cada teste os elementos no leito foram do mesmo tamanho distribuídos de tal modo a dar aparência de leito de rio natural.

Concluíram que a resistência ao escoamento depende da rugosidade de forma dos elementos e a sua distribuição no canal.

Uma equação teórica geral de resistência como a equação (2.17) deve ser complexa porque os processos pelos quais foi descrita são complexos porém requer maior refinamento para ser considerada de uso prático .

A tabela (2.1) apresenta uma comparação entre valores de $(8/f)^{1/2}$ observados, com aqueles calculados usando as equações sugeridas por Thompson e Campbell [20] e Hey [21].

Tabela (2.1) Comparação de valores observados e previstos de $(8/f)^{1/2}$, usando dados de rio

Site (1)	Dis- charge, in cubic meters per second (2)	Rela- tive sub- mer- gence R/D_{50} (3)	Ob- served value of $(8/f)^{1/2}$ (4)	Predicted Value of $(8/f)^{1/2}$ Using Equation of			
				Eq. 23 (5)	Thompson and Campbell (20) (6)	Kellerhals (14) (7)	Hey (11) (8)
Whiddybank	0.90	0.73	2.18	1.83	0.61	1.54	0.77
	3.90	1.34	3.07	2.81	2.07	2.28	2.23
	7.20	1.77	3.50	3.34	2.83	2.68	2.92
Cronkley A	1.37	1.02	1.60	1.52	1.36	1.59	1.74
	4.00	1.36	2.50	2.16	2.10	2.13	2.47
	7.10	1.65	3.18	2.65	2.62	2.44	2.95
Cronkley B	1.10	1.09	2.35	1.89	1.53	2.08	2.19
	4.00	1.79	3.33	2.86	2.86	2.79	3.41
	7.10	2.17	4.22	3.38	3.39	3.23	3.88
Note: 1 m ³ = 35.3 cu ft.							

Jarret,R,D (1984), empregou um método simples e objetivo para desenvolver uma equação para determinar o coeficiente **n** de Manning de canais naturais de grande declividade ($i > 0,002$ m/m), usando técnicas de regressão múltipla e medições de declividades e raios hidráulicos.

$$n = 0,39 i^{0,38} R^{-0,16} \quad (2.18)$$

A equação pode ser usada para as seguintes condições:

- Canais naturais com leito e margens fixas.
- Declividades entre 0,002 e 0,04; e raio hidráulico entre 0,15m e 2,1m
- É aplicável a escoamentos com pequena quantidade de sedimento em suspensão.
- O erro no coeficiente **n** poderá atingir 28% e a faixa de precisão varia entre -24% e 32%.

Bathurst,J.C (1985), desenvolveu uma equação para avaliar a resistência ao escoamento em rios de montanha (onde o material do leito é composto de pedras, seixos e matações) com declividades de 0,4 a 4%, baseado em suas pesquisas anteriores e no estudo da lei semi-logarítmica de resistência para leitos com seixos desenvolvido por Hey,R.D. [21], pois este é o mais comum e completo teoricamente quando se trata de escoamentos sem transporte de sedimento, para uso prático em engenharia. Sendo a equação de Hey :

$$\left(\frac{8}{f} \right)^{1/2} = 5,62 \log \left(\frac{aR}{3,5D_{84}} \right) \quad (2.19)$$

a : coeficiente que define o efeito de forma da seção transversal do canal (entre 11,1 e 13,46).

Uma equação empírica foi aproximada para abranger a região de rugosidade de grande escala ($\bar{y} / D_{84} < 1$). (Figura 2.10)

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = 5,62 \log\left(\frac{\bar{y}}{D_{84}}\right) + 4 \quad (2.20)$$

Onde :

$\bar{y} / D_{84}$: submersão relativa

A equação (2.20) permite calcular $(8/f)^{1/2}$ com um erro de $\pm 25\%$ a $\pm 35\%$.

Figura 2.11 Diagrama para o cálculo de $(8/f)^{1/2}$ em função de y/D_{84} para escoamentos uniformes

Thorne, C.R e Zevenbergen, L.W (1985) testaram as equações desenvolvidas por [18], [20], e [21] para rugosidade de grande escala com dados de rios de montanha.

Os pesquisadores recomendaram a equação de Hey[21] equação(2.19) para valores $R/D_{84} > 1$ e obtiveram surpreendentes resultados, com erros no cálculo de velocidades da ordem de 6%. A equação (2.13) de Bathurst[18] e a equação (2.15) de Thompson e Campbell[20] para valores de $R/D_{84} < 1$, foram vulneráveis a erros acima do 30%.

Aguirre-Pe, J. e Fuentes, R. (1990), desenvolveram uma teoria de resistência ao escoamento para canais com grande declividade (0,4% a 5%) e fundo rugoso (submersão relativa $y/D_{84} < 6$), levando em conta a existência de uma região de esteiras com grande turbulência próxima ao leito rugoso. Identificaram duas regiões no escoamento, a primeira, perto dos topos dos elementos de rugosidade, contendo esteiras geradas pelos topos das rugosidades onde a distribuição de velocidades não é logarítmica (quando a submersão relativa é pequena) e a segunda região localizada sobre a primeira, com distribuição logarítmica de velocidades. A figura (2.11) mostra o esquema definindo o escoamento nas duas regiões.

A primeira região tem uma espessura proporcional ao diâmetro D dos elementos de rugosidade por um fator linear chamado fator de esteira (β).

Figura 2.12 Esquema do escoamento proposto por Aguirre-Pe et al. (1986)

A velocidade média (U) é dada como sendo:

$$U = \frac{u_1 \beta D}{d} + \frac{1}{d} \int_{\beta d}^d u dy \quad (2.21)$$

Onde, d é a profundidade do escoamento medido desde o topo do elemento de rugosidade, e dy é a derivada da altura para a qual u foi medida. O termo integral corresponde à região logarítmica para a qual:

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{\alpha D} + C_1 \quad (2.22)$$

Onde, $\kappa = 0,407$ é a constante universal de Von Kármán, e $C_1 = 8,5$

Sendo α , o fator relacionado ao diâmetro do grão de areia de Nikuradse, $k_s = \alpha D$

Das equações (2.21) e (2.22), obtém-se:

$$C^* = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{d}{\alpha D} + B - \frac{1}{\kappa} + \frac{\beta D}{\kappa d} + \frac{\beta D}{d} \left(\frac{u_1}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\beta D}{\alpha D} - B \right) \quad (2.23)$$

Onde C^* é denominado coeficiente adimensional de Chézy, $C^* = C/g^{1/2}$

Fazendo $u = u_1$ para $y = \beta D$, a equação (2.23) fica como:

$$C^* = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{d}{\alpha D} + B - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \frac{\beta D}{d} \quad (2.24)$$

e

$$C^* = C_0^* + \frac{1}{\kappa} \frac{\beta D}{d} \quad (2.25)$$

Na qual:

$$C_0^* = \left(\frac{8}{f_0} \right)^{1/2} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{d}{\alpha D} + B - \frac{1}{\kappa} \quad (2.26)$$

Onde C_0^* é o coeficiente adimensional de Chézy para o escoamento sem o efeito de esteira relacionado a f_0 (fator de atrito para rugosidade de pequena escala). Para propósitos práticos eles recomendaram $\alpha = 6,8$ e $\beta = 0,3$.

Os resultados da pesquisa em laboratório são apresentados na figura (2.12), onde C_c representa C^* estimado com a equação (2.24), C_e o valor de C^* obtido em laboratório.

Figura 2.13 Relação entre o coeficiente C^* calculado (C_c), e o coeficiente C^* obtido em laboratório (C_e)

A equação (2.24) foi testada para dados dos rios de montanha pesquisados por Judd e Peterson[11], Bathurst[18],[29], Thompson et al.[20], Thorne et al.[28] e outros. Os resultados foram comparados com os estimados usando as equações de Thompson et al.[20] (equação 2.15) e Bathurst[29] (equação 2.20).

ESCOAMENTO PERMANENTE E UNIFORME EM CANAIS DE FUNDO FIXO

3.1 GENERALIDADES

No escoamento permanente e uniforme, as propriedades físicas, tais como velocidade, profundidade, rugosidade e outras permanecem constantes no espaço e no tempo. Porém as equações do escoamento uniforme são usadas para canais naturais assumindo que a perda da energia numa seção para escoamento gradualmente variado é igual a perda em escoamento uniforme tendo a velocidade e raio hidráulico da seção.[11].

Hipóteses:

- a) Escoamento permanente ($Q = \text{cte}$)
- b) Escoamento uniforme ($y_1 = y_2$)
- c) Escoamento turbulento rugoso ($f = f_n(k/R)$)
- d) τ_o : distribuída uniformemente
- e) p : distribuída hidrostaticamente

Figura 3.1 Diagrama do escoamento uniforme em canais abertos.

Equação da quantidade de movimento na forma integral:

$$\sum \vec{F}_{ext_s} + \int_{vc} \rho \vec{B} d\forall = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho \vec{V} d\forall + \int_{sc} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot d\vec{A}) \quad (3.1)$$

Considerando as hipóteses (a) e (b) a equação (3.1) fica:

$$-\tau_0 P \Delta x + \rho g A \Delta x \sin \alpha = 0 \quad (3.2)$$

ou

$$\frac{\tau_0}{\rho} = g \frac{A}{P} \sin \alpha = g R \sin \alpha \quad (3.3)$$

Define-se velocidade de atrito u_* como sendo:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3.4)$$

Para valores pequenos do ângulo α pode-se fazer a seguinte aproximação:

$$\sin \alpha \cong \tan \alpha = i$$

Com as equações (3.3) e (3.4) em (3.2), obtém-se:

$$u_* = \sqrt{g R i} \quad (3.5)$$

Embora as dimensões de u_* sejam as de velocidade, a interpretação desta é diferente à de uma velocidade. Esta representa uma variação da flutuação da turbulência ao redor de um ponto próximo ao fundo do canal.[43].

3.2 DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE EM ESCOAMENTO UNIFORME TURBULENTO.

Em escoamento laminar é possível definir uma velocidade num ponto e no tempo. No escoamento turbulento não é possível fazer uma definição exata. O vetor velocidade não é constante. A velocidade e a pressão flutuam com o tempo e o espaço. Somente os valores médios destas flutuações podem ser calculados.[43]

Segundo Prandtl (1925), as flutuações estão confinadas dentro de um limite definido por um comprimento l , denominado comprimento de mistura. Figura (3.2)

Figura 3.2 Distribuição vertical da velocidade num canal com escoamento turbulento.

Onde:

$$\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = l \left(\frac{du}{dy} \right) = u_* \quad (3.6)$$

Sendo a variação da tensão de cisalhamento com a profundidade:

$$\tau = \tau_0 \frac{y}{d} \quad (3.7)$$

Considerando a variação da velocidade de atrito muito pequena, Prandtl substituiu $\tau = \tau_0$, o que admite a substituição de U_* (velocidade média de atrito) por u_* . A equação (3.6), fica:

$$U_*^2 = l^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (3.8)$$

O comprimento de mistura pode ser expresso como:

$$l = \kappa y \quad (3.9)$$

κ representa a constante universal definida por von Kármán, obtida experimentalmente. Em fluidos homogêneos, a constante é aproximadamente 0,4, o valor de κ é influenciado por fatores tais como a concentração de sedimento em suspensão, correntes secundárias, e pela rugosidade da parede[40], [41].

Substituindo o valor de l na equação (3.6), obtém-se;

$$\frac{du}{dy} = \left(\frac{1}{\kappa} \right) \frac{U_*}{y} \quad (3.10)$$

Integrando a equação (3.10) obtém-se:

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln y + C_0 \quad (3.11)$$

Onde C_0 é a constante de integração e pode ser avaliada pelas condições da parede.

A equação (3.11) proporciona o perfil da velocidade do escoamento turbulento como uma função da condição de parede refletido no valor de C_0 [11],[43].

A equação (3.11) é também expressa como:

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0} \quad (3.12)$$

Na equação (3.11), a constante C_0 é determinada quando $y = y_0$, isto corresponde à distância desde a parede onde a velocidade do escoamento é igual a zero. Desde que y_0 é influenciado pela condição da parede, a sua determinação é afetada pela natureza desta.

Para paredes lisas; $y_0 = 1/9 (\nu/U_*)$ e dos experimentos de Nikuradse a equação (3.12) fica:

$$\frac{u}{U_*} = 5,5 + 5,75 \log \frac{U_* y}{\nu} = 5,75 \log 9 \frac{y U_*}{\nu} \quad (3.13)$$

A equação (3.13), descreve a distribuição de velocidade do escoamento sobre parede hidraulicamente lisa.

Para paredes rugosas, $y_0 = k_s/30,1$. Substituindo na equação (3.12) e dos experimentos de Nikuradse, tem-se :

$$\frac{u}{U_*} = 8,5 + 5,75 \log \frac{y}{k_s} = 5,75 \log 30,1 \frac{y}{k_s} \quad (3.14)$$

A equação (3.14), descreve a distribuição de velocidade do escoamento sobre parede hidraulicamente rugosa.

Os detalhes da obtenção da constante de integração y_0 e das equações (3.13) e (3.14) constam na referência [43]. Estas equações podem ser integradas para diferentes formas de seção de canal.

A equação relacionando a velocidade média U , num canal de seção transversal retangular, parede rugosa e superfície livre, foi apresentada por Keulegan (1938) como:

$$\frac{U}{U_*} = 6,25 + 5,75 \log \frac{R}{k_s} \quad (3.15)$$

O parâmetro 6,25 na equação anterior reflete a forma da seção transversal, o fator 5,75 é uma função da constante κ proposta por von Kármán .

A distribuição de velocidades para canal muito largo de seção retangular e parede rugosa é dada como :

$$\frac{U}{U_*} = 6 + 5,75 \log \frac{R}{k_s} \quad (3.16)$$

3.3 REGIÕES DO ESCOAMENTO E RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE

O escoamento perto de uma parede lisa apresenta três regiões: subcamada viscosa, transição, e região de completa turbulência (figura 3.3). A distribuição de velocidades é parabólica na região de escoamento laminar (subcamada viscosa) e logarítmica na região turbulenta.

Figura 3.3 Desenvolvimento da camada limite num canal com uma condição ideal de entrada.

A espessura da subcamada viscosa δ é dada em função do número de Reynolds do grão ($\mathcal{R}_* = U_* k_s / \nu$) como sendo:

$$\frac{k_s}{\delta} = \frac{1}{11,6} \frac{U_* k_s}{\nu} \quad (3.17)$$

Ou:

$$\delta = 11,6 \frac{\nu}{U_*} \quad (3.18)$$

Com base no tamanho da rugosidade, as superfícies são classificadas dentro de três regimes : hidraulicamente liso, transição e hidraulicamente rugoso.

No **regime hidraulicamente liso**, o tamanho dos elementos rugosos são menores do que δ e

$$0 \leq \mathcal{R}_* \leq 3,63 \sim 5$$

No **regime de transição**, parte dos elementos rugosos sobressaem da subcamada viscosa contribuindo à resistência do escoamento devido principalmente à resistência de forma.

$$3,68 \sim 5 \leq \mathcal{R}_* \leq 68 \sim 70$$

No **regime hidraulicamente rugoso**, todos os elementos rugosos sobressaem da subcamada viscosa sendo a resistência ao escoamento devido à resistência de forma.

$$\mathcal{R}_* > 68 \sim 70$$

RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM CANAIS

A resistência ao escoamento descreve os processos pelos quais a forma física e a rugosidade do leito de um canal controlam a profundidade, largura e velocidade média do escoamento no canal. Estes processos são explicados por um coeficiente de resistência. Três são os coeficientes mais usados; n de Manning, C de Chezy e f de Darcy-Weisbach.

4.1 AVALIAÇÃO TEÓRICA DA RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

São muitas as grandezas que influem na resistência ao escoamento. Uma fórmula geral de escoamento que considera o maior número de variáveis é da seguinte forma:

$$f_n(U, y, i, \rho, \mu, g, D, \sigma, \rho_s, S_p, S_R, S_c, F_s) = 0 \quad (4.1)$$

Onde;

U	= velocidade
y	= profundidade
i	= declividade da linha de energia
ρ	= massa específica do fluido
μ	= coeficiente dinâmico de viscosidade
g	= aceleração da gravidade
D	= diâmetro característico do material do leito
σ	= desvio padrão da distribuição do tamanho do material do leito
ρ_s	= massa específica do sedimento

- S_p = fator de forma da partícula
 S_R = fator de forma da extensão do canal
 S_c = fator de forma da seção transversal do canal
 F_s = força de infiltração no leito do canal

A influência de alguns destes fatores na resistência ao escoamento é conhecida, mas é difícil de considerá-la pela sua complexidade. Os efeitos de outros são desconhecidos. Considerando tais circunstâncias, a equação (4.1) pode ser transformada como:

$$\frac{U}{U_*} = f_n \left(\Re, \frac{D}{y}, \frac{1}{R_w}, \frac{\tau}{\gamma'_s D} \right) \quad (4.2)$$

Onde;

$$U/U_* = \text{uma medida da resistência} = U/(gRS)^{1/2}$$

$$\Re = \text{número de Reynolds} = UR/\nu$$

$$D/y = \text{rugosidade relativa}$$

$$R_w = \text{número de Reynolds da partícula (relacionado à velocidade de queda)} = wD/\nu$$

$$\tau/\gamma'_s D = \text{número de Froude relacionado à partícula}$$

Para fundo fixo, γ'_s representa o peso específico submerso de uma partícula e w sua velocidade de queda, os quais podem ser admitidos iguais a infinito. Então $\tau/\gamma'_s D$ e $1/R_w$ são iguais a zero. A equação (4.2) fica:

$$\frac{U}{U_*} = f_n \left(\Re, \frac{D}{y} \right) \quad (4.3)$$

U/U_* , pode ser transformado como:

$$\frac{U}{U_*} = \frac{U}{\sqrt{gR}} \frac{1}{\sqrt{i}} = \frac{F}{\sqrt{i}} \quad (4.4)$$

Onde, F é o número de Froude do escoamento. Substituindo o valor de U/U_* da equação (4.3), tem-se:

$$i = F^2 f_{n_1} \left(\Re, \frac{D}{y} \right) \quad (4.5)$$

$$i = F^2 f_{n_2} \left(\Re \right) \left(\frac{D}{y} \right)^n \quad (4.6)$$

Muitas fórmulas tem esta forma.

4.2 RESISTÊNCIA DE SUPERFÍCIE E RESISTÊNCIA DE FORMA

A resistência efetiva pode ser obtida como a soma do atrito na superfície plana e a resistência de forma dos elementos rugosos [15]. A resistência de superfície ou rugosidade do grão é devido à força de cisalhamento. A rugosidade de forma é atribuído às diferenças de pressão na presença de grandes elementos [11].

4.3 RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM CANAIS DE FUNDO FIXO

A avaliação da resistência ao escoamento é feita admitindo-se, a resistência de forma e o efeito de parede iguais a zero. Isto é análogo a assumir um leito muito largo, com fundo plano e fixo. Um grande número de fórmulas tem sido desenvolvidas para este caso.

4.3.1 Fórmula de Manning

Manning(1889), apresentou uma equação para avaliar a velocidade media em canais. Esta fórmula define a resistência ao escoamento:

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2} \quad (4.7)$$

em unidades métricas.

A equação pode ser transformada como sendo:

$$\frac{U}{U_*} = \frac{R^{1/6}}{n\sqrt{g}} \quad (4.8)$$

Para a qual n tem as seguintes dimensões:

$$|n| = TL^{-1/3} \quad (4.9)$$

É difícil aceitar que n seja uma função do tempo. Para vencer esta anomalia, é

admitindo: $n = \frac{n'}{\sqrt{g}}$ substituindo este valor na equação (4.9) tem-se:

$$n' = L^{1/6} \quad (4.10)$$

Se, n' é chamado n , a equação (4.10) obtém-se:

$$n = L^{1/6} \quad (4.11)$$

Esta dimensão é geralmente aceita.

4.3.2 Fórmula de Chézy

Chézy (1769), admitiu que a força de arrasto poderia ser expressa em termos das grandezas dinâmicas de resistência, viscosidade e velocidade;

$$\tau_o = f\rho \frac{U^2}{8} \quad (4.12)$$

Substituindo a equação (4.12) nas equações (3.4) e (3.5) obtém-se:

$$U = \sqrt{\frac{8\gamma}{f\rho}} \sqrt{Ri} \quad (4.13)$$

ou

$$U = C\sqrt{Ri} \quad (4.14)$$

Sendo;

$$C = \sqrt{\frac{8\gamma}{f\rho}} \quad (4.15)$$

As dimensões são: $C = |L^{1/2}/T|$; é possível definir um coeficiente adimensional admitindo:

$$C = C'\sqrt{g} \quad (4.16)$$

onde C' é adimensional .

4.3.3 Fórmula de Darcy-Weisbach

A fórmula desenvolvida inicialmente para condutos forçados estabelece:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g} \quad (4.17)$$

Onde h_f é a perda por atrito associado aos condutos forçados, f é o fator de atrito, L é o comprimento do conduto, D é o diâmetro.

Desde que $D = 4R$ e a declividade da linha de energia $i = h_f/L$, na equação (4.17) tem-se :

$$f = \frac{8gRi}{U^2} \quad (4.18)$$

Onde R é o raio hidráulico, com a equação (3.5), na equação (4.18) obtém-se:

$$\frac{U}{U_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (4.19)$$

A equação (4.19) pode ser aplicada para escoamento em canais.

Das equações (4.8), (4.15) e (4.19), é possível uma relação entre os coeficientes de resistência:

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = \frac{C}{g^{1/2}} = \frac{R^{1/6}}{ng^{1/2}} \quad (4.20)$$

Destes coeficientes, somente o fator de resistência de Darcy - Weisbach é adimensional, isto proporciona uma vantagem científica [27].

4.3.4 Equações Semi - logarítmicas de Resistência ao Escoamento

As funções semi - logarítmicas de resistência ao escoamento, de acordo com a teoria de mistura de Prandtl (1926), foram apresentadas no item (3.2). As equações obtidas da integração da equação (3.14) como dadas nas equações (3.15) e (3.16), podem ser fornecidas da seguinte forma:

Para canal de seção retangular e parede rugosa;

$$\frac{U}{U_*} = 6,25 + 5,75 \log \frac{R}{k_s} = 5,75 \log \left(\frac{12,02 y}{k_s} \right) \quad (4.21)$$

A equação (4.21), também é da forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,036 \log \left(\frac{12,14 y}{k_s} \right) \quad (4.22)$$

Para canal retangular largo, segundo Keulegan (1938), obtém - se a seguinte equação:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,03 \log \left(\frac{11,09 y}{k_s} \right) \quad (4.23)$$

As equações semi - logarítmicas são amplamente usadas em hidráulica e dão uma boa avaliação da resistência ao escoamento em canais com rugosidade de areia sem transporte de sedimentos.

4.3.5 Formulas do Tipo Monomial

A formula do tipo monomial é expressa como:

$$\frac{U}{U_*} = a \left(\frac{R}{D_{90}} \right)^{1/m} \quad (4.24)$$

O coeficiente a e o parâmetro m , podem ser determinados para cada caso particular. Para valores de a e m iguais a 8,30 e 6 respectivamente, a equação (4.24) reduz-se à formula de Manning- Strickler:

$$\frac{U}{U_*} = 8,30 \left(\frac{R}{D_{90}} \right)^{1/6} \quad (4.25)$$

Da equação (3.15), apresentada por Keulegan (1938), para $m = 6$ tem-se:

$$\frac{U}{U_*} = 8,12 \left(\frac{R}{k_s} \right)^{1/6} \quad (4.26)$$

A equação anterior pode ser utilizada para avaliar a resistência ao escoamento em canais naturais [17].

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA DISTRIBUIÇÃO, TAMANHO E FORMA DOS ELEMENTOS DE RUGOSIDADE ARTIFICIAL

Na tentativa de abordar a resistência hidráulica ao escoamento de um rio de montanha com rugosidade de grande escala num modelo físico reduzido, apresenta-se a seguinte revisão bibliográfica:

Segundo **Sayre, W.W. e Albertson, M. L. (1963)**, a equação (2.2) é da forma:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y_n}{k} + C_0 \quad (5.1)$$

Eles introduziram a constante de integração C_0 e a altura do elemento de rugosidade dentro do parâmetro χ , sendo:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y_n}{\chi} \quad (5.2)$$

Onde χ é considerado como o parâmetro geral de rugosidade que é uma função do tamanho relativo dos elementos de rugosidade.

Nnaji, S. e Ipai Wu (1979), baseados nas experiências de Sayre e Albertson[40], desenvolveram um estudo para avaliar a resistência hidráulica em canais com vegetação usando o conceito de rugosidade cilíndrica para escoamentos onde a profundidade do escoamento é menor do que a altura do elemento de rugosidade.

Rugosidade Cilíndrica

Define-se as características dos elementos de rugosidade para avaliar a resistência hidráulica como sendo:

Figura 5.1 Limites de integração

k = altura do elemento, t = comprimento do elemento e l = largura do elemento. Para rugosidade cilíndrica tem-se: $l = t = D =$ diâmetro do cilindro.

Outras características consideradas são : u = espaçamento longitudinal, w = espaçamento transversal, y = profundidade do fluxo e λ = concentração dos elementos definido como sendo:

$$\lambda = N(A_p / A)$$

A_p = Área projetada do elemento de rugosidade na direção normal ao escoamento = $y D$

N = Número de elementos

A = Área do leito do canal

Sendo $A = 1 \text{ m}^2$, tem-se :

$$\lambda = N y D \quad (5.3)$$

Foi definido o desvio padrão (σ) do perfil de rugosidade para o elemento de forma cilíndrica expresso em termos da concentração de rugosidade λ :

$$\sigma^2 = E(z^2) - [E(z)]^2 \quad (5.4)$$

O termo $z(u, w)$ foi definido como uma grandeza randômica da elevação do leito, o termo $E(z)$ é o valor de $\langle z \rangle$.

Da figura 5.1 $z(u, w) = k$ quando $0 \leq s \leq r$, e $z(u, w) = 0$ quando $s > r$

Integrando os termos da equação (5.4) para u e w tem-se :

$$\sigma^2 = \frac{\pi kD \left[\frac{kD - \pi kD}{4uw} \right]}{4uw} \quad (5.5)$$

Para elementos de rugosidade não submersos $k = y$ e $\lambda = N(yD/uw) = NyD$ tem-se:

$$\sigma^2 = 0.25 \pi \lambda D (y - 0.25 \pi \lambda D) \quad (5.6)$$

Baseados em dados de outros pesquisadores Nnaji e Ipai Wu obtiveram uma relação entre os valores de σ e χ para escoamentos em canais com vegetação, como sendo:

$$\chi = 141.6 \sigma^{1.915}, \quad \text{coeficiente } R^2 = 0.89 \quad (5.7)$$

$$\chi = 0.36 \lambda^{1.469} \quad (5.8)$$

5.1 ESTUDO EM MODELO FÍSICO REDUZIDO

Pretende-se avaliar a resistência hidráulica em modelo físico reduzido com o objetivo de representar a rugosidade de grande escala para um rio de montanha do Peru. Tendo como base o estudo desenvolvido por Nnaji, S. e Ipai Wu [33], a autora do presente estudo testou a resistência hidráulica ao escoamento para 5 tipos de arranjos de elementos artificiais cilíndricos (figura 5.2) em um canal de características similares as do protótipo.

Características do Modelo Físico:

Escala do modelo 1:40 sem distorção, seguindo a lei de semelhança de Froude

Declividade do canal $i = 0.018\text{m/m}$ mantida constante

Largura do canal (B) entre 1.5m e 2m, representando a topografia do protótipo.

Testes:

Para cada arranjo de rugosidade artificial de altura 0.02m e 0.025m de diâmetro se fizeram medições de velocidades e profundidades do escoamento para vazões do protótipo de 20,50,100,200,400 e 600 m³/s. (figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6)

Sendo a escala longitudinal $L_R = 1/40$

Tem-se :

Escala de rugosidades $n_R = n_m / n_p = (L_R)^{1/6} = 0.54074$

Os resultados dos ensaios são apresentados na tabela (5.1)

Figura 5.2 Esquema dos cinco arranjos dos elementos de rugosidade

Figura 5.3 Arranjo tipo B para os testes 7 a 12 no modelo

Figura 5.4 Arranjo tipo C para os testes 13 a 18 no modelo

Figura 5.5 Arranjo tipo E para os testes 25 a 30 no modelo

Figura 5.6 Escoamento no modelo para arranjo tipo E

Arranjo	No Teste	Qp (m3/s)	y (m)	U (m/s)	n	U*(m/s)	U/U*	χ	λ	N
A	1	20	0.0075	0.223	0.023	0.03639	6.128	0.0006118	0.013019	69
	2	50	0.0130	0.294	0.025	0.04791	6.136	0.0010568	0.018887	58
	3	100	0.0220	0.327	0.032					
	4	200	0.0280	0.447	0.028					
	5	400	0.0400	0.733	0.021					
	6	600	0.0490	1.042	0.017					
B	7	20	0.0080	0.217	0.025	0.03759	5.774	0.0007543	0.015013	75
	8	50	0.0140	0.283	0.028	0.04972	5.692	0.0013649	0.022481	64
	9	100	0.0230	0.322	0.034					
	10	200	0.0310	0.444	0.030					
	11	400	0.0490	0.630	0.029					
	12	600	0.0570	0.858	0.023					
C	13	20	0.0100	0.176	0.035	0.04202	4.188	0.0018032	0.027173	109
	14	50	0.0200	0.214	0.046	0.05943	3.601	0.0045855	0.051294	103
	15	100	0.0290	0.290	0.044					
	16	200	0.0332	0.440	0.031					
	17	400	0.0512	0.625	0.030					
	18	600	0.0590	0.860	0.024					
D	19	20	0.0120	0.138	0.051	0.04603	2.998	0.0035211	0.042852	143
	20	50	0.0220	0.154	0.068	0.06233	2.471	0.0080083	0.074974	136
	21	100	0.0320	0.260	0.052					
	22	200	0.0350	0.430	0.033					
	23	400	0.0512	0.620	0.030					
	24	600	0.0613	0.870	0.024					
E	25	20	0.0140	0.110	0.071	0.04972	2.212	0.0056644	0.059229	169
	26	50	0.0230	0.134	0.081					
	27	100	0.0330	0.240	0.058					
	28	200	0.0360	0.420	0.035					
	29	400	0.0520	0.625	0.030					
	30	600	0.0620	0.890	0.024					

Tabela 5.1 Resumo das Medições no Modelo para cada Arranjo Testado. Os valores do Parâmetro de Resistência χ foram obtidos pela Eq. 5.2, λ da Eq. 5.8 e o Numero de Elementos (N) da equação 5.3

Foi feita a análise inversa ,tendo o número de elementos (N) por metro quadrado da área do leito, para cada arranjo testado no modelo foram calculados os valores da Concentração dos elementos λ (Equacao 5.3), os do Desvio Padrão σ (Equacao5.6) e os valores do Parâmetro de Resistencia χ (Equacao5.2). O resumo dos cálculos é apresentado na tabela (5.2).

Uma nova relação de χ vs σ foi ajustada pelo método dos mínimos quadrados para os valores calculados (figura 5.7):

$$\chi = 75.53\sigma^{1.755} \quad (5.9)$$

Arranjo	No Teste	Qp (m3/s)	y (m)	U (m/s)	n	U*	U/U*(m/s)	χ	N	λ	σ
A	1	20	0.0075	0.223	0.023	0.03639	6.128	0.00061179	61	0.01144	0.00115
	2	50	0.0130	0.294	0.025	0.04791	6.136	0.00105677	61	0.01983	0.00199
	3	100	0.0220	0.327	0.032						
	4	200	0.0280	0.447	0.028						
	5	400	0.0400	0.733	0.021						
	6	600	0.0490	1.042	0.017						
B	7	20	0.0080	0.217	0.025	0.03759	5.774	0.00075431	86	0.01720	0.00145
	8	50	0.0140	0.283	0.028	0.04972	5.692	0.00136493	86	0.03010	0.00253
	9	100	0.0230	0.322	0.034						
	10	200	0.0310	0.444	0.030						
	11	400	0.0490	0.630	0.029						
	12	600	0.0570	0.858	0.023						
C	13	20	0.0100	0.176	0.035	0.04202	4.188	0.00180318	111	0.02775	0.00204
	14	50	0.0200	0.214	0.046	0.05943	3.601	0.00458553	111	0.05550	0.00408
	15	100	0.0290	0.290	0.044						
	16	200	0.0332	0.440	0.031						
	17	400	0.0512	0.625	0.030						
	18	600	0.0590	0.860	0.024						
D	19	20	0.0120	0.138	0.051	0.04603	2.998	0.00352107	171	0.05130	0.00300
	20	50	0.0220	0.154	0.068	0.06233	2.471	0.00800833	171	0.09405	0.00551
	21	100	0.0320	0.260	0.052						
	22	200	0.0350	0.430	0.033						
	23	400	0.0512	0.620	0.030						
	24	600	0.0613	0.870	0.024						
E	25	20	0.0140	0.110	0.071	0.04972	2.212	0.00566438	221	0.07735	0.00394
	26	50	0.0230	0.134	0.081						
	27	100	0.0330	0.240	0.058						
	28	200	0.0360	0.420	0.035						
	29	400	0.0520	0.625	0.030						
	30	600	0.0620	0.890	0.024						

Tabela 5.2 Resumo das Medições no Modelo obtidos para cada Arranjo Testado. Os Numeros de Elementos (N) foram pegados do esquema de arranjos (Figura 5.2). Os valores de λ foram obtidos da Eq. 5.3 , os do Parâmetro de Resistência χ da Eq. 5.2 e os de σ da Eq.5.6

Figura 5.7 Relação entre o Parâmetro de Rugosidade (χ) e o Desvio Padrão do Perfil da Rugosidade (σ) dos Dados do Modelo

Figura 5.8 Relação entre o Parâmetro de Espaçamento da Rugosidade ($\Psi = \chi/a$) e a Densidade da Rugosidade ($ab/[x(e+b)]$)

Onde, a , e , b e x são definidos pelo Sayre et al.[40] como sendo:

5.2 RESULTADOS

O arranjo "E" apresenta maior resistência ao escoamento e em consequência uma redução dos valores de velocidades, isto fica demonstrado com o acréscimo dos valores do parâmetro de resistência (χ) que é função da concentração dos elementos (λ). Para os fins de representar a rugosidade de grande escala do protótipo no modelo, o arranjo "E" foi elegido pelo fato de oferecer coeficientes n de Manning similares aos do protótipo, $0.04 < n_p < 0.13$ ($n_p = n$ do modelo / n_R)

A equação (5.8) com coeficiente de determinação ($R^2 = 0.89$) proporcionado por Soronadi Nnaji e Ipai Wu [33], foi ajustada para os dados dos ensaios do modelo, obtendo-se a equação (5.9). O coeficiente de determinação obtido ($R^2 = 0.9381$) para esta equação mostra um maior grau de ajuste.

Tendo como base o número e tamanho dos elementos cilíndricos, uma boa aproximação da resistência ao escoamento pode ser obtida da equação (5.2) proposta por Sayre, W. e Albertson, M determinando o parâmetro de resistência (χ) da equação (5.9) definida no presente estudo, o desvio padrão do perfil da rugosidade (σ) definida por Soronadi Nnaji e Ipai Wu da equação (5.6) e a concentração dos elementos (λ) da equação (5.3).

Na figura (5.8) faz-se uma comparação gráfica da resistência ao escoamento usando os elementos do presente estudo com outras formas geométricas de elementos. Tendo-se como base a figura (2.4) com os resultados experimentais de Sayre e Koloseus construiu-se uma figura similar na qual inclui-se os parâmetros da resistência obtida com elementos cilíndricos. Na figura (5.8) existe uma tendência geral ao aumento do parâmetro de espaçamento $\Psi = \chi/a$ com o incremento da densidade da rugosidade. Mostra-se que os elementos cilíndricos apresentam menor resistência ao escoamento do que as avaliações feitas com cubos e blocos retangulares para densidades de rugosidade similares.

RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM RIOS DE MONTANHA**6.1 GENERALIDADES**

O escoamento em rios de montanha pode ser não uniforme e variado como resultado da escarpada hidrografia, da geometria não uniforme da seção transversal e da vazão lateral. As profundidades podem ser pequenas, o qual junto com sedimentos de grandes dimensões, produz a rugosidade de grande escala. Em condições de rugosidade de grande escala, a superfície livre do escoamento é controlada pelos elementos rugosos. Nestas condições as formulações de resistência ao escoamento desenvolvidas por varios investigadores representam um método indireto para estimar a velocidade média e a vazão nestes rios.

6.2 CARATERÍSTICAS DO ESCOAMENTO

O escoamento em rios de montanha pode ser descrita como escoamento turbulento sobre uma parede rugosa e fixa.

Figura 6.1 Regiões no escoamento da camada limite

Podem ser distinguidas diferentes regiões na profundidade do escoamento (Fig. 6.1), uma região *interna* próxima do leito onde os efeitos da tensão de cisalhamento e da rugosidade são predominantes, na região *externa* os efeitos diretos dos parâmetros da rugosidade local são menos significativos e a região de *escoamento livre*, que em teoria é livre de atrito e turbulência. Porém, na natureza, esta região de escoamento livre poderia conter ambiente de turbulência gerado em seções a montante, mas muitas vezes não pode ser identificado.

Em geral, o escoamento é inteiramente considerado dentro da camada limite, embora esta ocupe aproximadamente 80 a 90% da profundidade do escoamento [13].

Dentro da região interna são distinguidas outras zonas, uma subcamada viscosa, uma zona de transição onde o escoamento passa de laminar a turbulento, e uma zona logarítmica.

Na região externa, as condições predominantes não garantem a aplicação de um perfil logarítmico de velocidades, as velocidades na superfície excedem às velocidades estimadas com a distribuição logarítmica [28].

A turbulência induzida pela grande rugosidade no leito é levada em conta para identificar a região de esteira ou subcamada rugosa dentro da região interna. Aguirre - Pe e Fuentes [3] distinguiram duas regiões na distribuição de velocidades (figura 2.12), uma região de esteira perto do leito onde a velocidade foi assumida constante e outra acima da primeira cuja distribuição de velocidade foi descrita em termos de um perfil logarítmico.

6.3 ESCALA DE RUGOSIDADE

As declividades dos rios de montanha são geralmente maiores do que 0,1 a 0,4 % mas menores do que 5% a 10%. Em declividades pronunciadas, os canais parecem desenvolver uma serie de pequenas piscinas e quedas. A escala de rugosidade em rios de montanha podem ser de pequena escala em leitos de areia e pedregulho, a grande escala em leitos compostos de seixos e matacões. A classificação feita por Bathurst et

al.[5] da escala de rugosidade em função da submersão relativa ou relação entre profundidade, y , e tamanho do sedimento D_{84} é dada como sendo:

Rugosidade de grande escala,

$$y/D_{84} < 1,2$$

Rugosidade de escala intermediária,

$$1,2 < y/D_{84} < 4$$

Rugosidade de pequena escala,

$$y/D_{84} > 4$$

Em leitos com rugosidade de grande escala a resistência ao escoamento é causado principalmente pela resistência de forma dos elementos do leito, distorção da superfície livre e pelos ressaltos hidráulicos locais [6]. Em rugosidade de escala intermediária, a resistência de forma e a resistência de superfície contribuem com a resistência ao escoamento. Para rugosidade de pequena escala, as variações no tamanho, distribuição e espaçamento dos elementos são menos significativos [5].

6.4 REGIMES DO ESCOAMENTO

Em hidráulica de rios o regime do escoamento é usado para identificar o comportamento hidráulico do escoamento ou a resposta morfológica do leito. O regime de escoamento pode ser classificado pelo número de Froude (F).

Baseados em observações de escoamentos de canais naturais e de laboratório Peterson, D. e Mohanty, P.[36] propuseram três classificações do escoamento para canais de grande declividade e rugosidade:

Regime *tranquilo*, regime “*tumbling*” e regime *rápido*.

Os regimes *tranquilo* e *rápido* são denominados de escoamento subcrítico e supercrítico respectivamente (figura 6.2). No regime “*tumbling*” (figura 6.3) os elementos de rugosidade induzem o escoamento supercrítico sobre seus topos seguidos de ressaltos hidráulicos individuais até o estado tranquilo.

Figura 6.2 Escoamentos do tipo (a) rápido e (b) tranqüilo em canal de laboratório

Figura 6.3 Escoamento do tipo “tumbling” em canal experimental

Em canais com rugosidade de pequena escala e escoamento em regime subcrítico ($F < 1$), as forças de gravidade são mais pronunciadas que as de inércia. Para baixos valores do numero de Froude ($F < 0,5$), os efeitos de grandes elementos de rugosidade ou da irregularidade na geometria da seção transversal produzem uma ligeira depressão da superfície livre.[5], [6], [14].

A figura (6.2) do estudo de Peterson et al.[36], indica que para valores intermediários ($L = 10k$) do espaçamento de rugosidade o numero de Froude decresce e

em consequência oferece maior resistência ao escoamento. Para baixos valores de rugosidade relativa (expressa por eles como k/y) o número de Froude tende a se incrementar.

Figura 6.4 Variação do número de Froude (F), em função da rugosidade relativa (k/y) e o espaçamento relativo (L).

Em altas velocidades, o escoamento chega a ser supercrítico ($F > 1$), as forças de inércia são mais significativas que as forças de gravidade e o escoamento é usualmente descrito como *rápido*. O escoamento em regime *rápido* difere do “*tumbling*” em que o primeiro é sempre supercrítico, não são formados os ressaltos hidráulicos entre os elementos de rugosidade, a magnitude e direção da velocidade são essencialmente as mesmas acima e entre os elementos.

6.5 FÓRMULAS DE RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

Os estudos de Bathurst [4], Herbich et al.[25], Judd et al.[29], Thompsom et al.[44] indicaram que a resistência ao escoamento em canais com rugosidade de grande escala é relacionado principalmente à resistência de forma dos elementos e a sua disposição no canal. Os processos de resistência associados são diferentes aos de rugosidade de pequena escala. O'Loughlin et al.[34] e Bayazit[9], baseados em estudos de laboratório mostraram que para valores de rugosidade relativa $k/d > 0,3$ a resistência ao escoamento é maior que a estimada usando a equação logarítmica de resistência para rugosidade de pequena escala.

Tem sido propostas diversas formulações semi-analíticas e puramente empíricas para a resistência ao escoamento em canais de grande declividade. São de especial interesse as formulações desenvolvidas por Bathurst[4], [6], Hey [26], Thompson e Campbell [44], Bathurst et al.[5] (tabela 6.1). Porém, como estabelecido por Bathurst[6], não tem sido desenvolvida uma equação de resistência geral para diferentes condições em rios de montanha.

Bathurst[4] desenvolveu a equação (6.5), baseada na geometria da rugosidade em rios com leito composto de matações, grande declividade e regime do escoamento do tipo “tumbling”. Nos lugares examinados a forma da rugosidade e a distribuição foram aproximadamente constantes. As concentrações frontal e basal (λ_1 e λ_2 respectivamente) foram relacionadas à rugosidade relativa de forma empírica. Bathurst et al.[5] sugeriram a equação (6.5) para ser valida quando $y/D_{84} < 1,2$, e a equação (6.3) para grandes valores de y/D_{84} .

Hey [26] utilizou uma formula logarítmica de resistência para leitos com pedregulho (equação 6.1), e considerou a influência da forma da seção transversal por a com valores de 11,1 a 13,5. Para rugosidade de pequena e media escala, Thorne e Zevenbergen [45] recomendaram o uso da equação de Hey.

Bathurst[6] baseado em estudos anteriores sugeriu a formula logarítmica (6.4) para declividades na faixa de 0,4 a 4%.

Thompson e Campbell [44] propuseram uma formula semi-logarítmica (equação 6.2) na base de observações de escoamento em um dissipador de energia com leito de pedras. Thorne e Zevenbergen [45] recomendaram o uso das equações (6.5) e (6.2) para valores de $R/D_{84} < 1$.

Bathurst et al.[5] expressaram f como uma função de $\Re$, F , a concentração frontal efetiva λ_1 e os efeitos da não uniformidade da geometria do canal. Porém, as considerações destes parâmetros não levariam a melhores resultados comparados com outras equações mais simples [45].

Forma semi logarítmica	$\sqrt{\frac{8}{f}} = A + B \log(X)$			faixa de validade	equação número
	A	B	X		
Hey (1979)	0	15,90	$\frac{aR}{3,5D_{84}}$	$\frac{R}{D_{84}} > 1$	6.1
Thompson et al. (1979)	5,66	$-0,566 \frac{k_s}{R}$	$12 \frac{R}{k_s}$	$\frac{y}{D_{84}} > 1,2$	6.2
Bathurst et al. (1981)	$14,7 \beta_2$	$1,842 \frac{B}{D_{84}} \beta_2$	$\frac{R}{1,2D_{84}}$	$\frac{y}{D_{84}} > 1,2$	6.3
Bathurst (1985)	4	5,62	$\frac{y}{D_{84}}$	$0,3 < \frac{R}{D_{84}} < 1$	6.4
Forma monomial	$\sqrt{\frac{8}{f}} = AX^b$			faixa de validade	
	A	b	X		
Bathurst (1978)	β_1	2,34	$\frac{R}{0,365D_{84}}$	$\frac{R}{D_{84}} < 1,5$	6.5

Tabela 6-1 Equações de resistência ao escoamento para rugosidade de escala media a grande

Na tabela (6.1) tem-se:

$\beta_i = \left(\frac{B}{y}\right)^{7(\lambda_i - 0,08)}$, sendo λ_1 a área frontal dos elementos de rugosidade por m² de leito,

λ_2 a área plana dos elementos de rugosidade por m² de leito [4].

Aguirre Pe et al.[3] propuseram a equação (6.6), levando em conta a existência de grande turbulência na região de esteira próxima ao leito de canais de grande rugosidade.

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{\alpha D} + B - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \frac{\beta D}{y} \quad (6.6)$$

Onde, α é o fator de textura e β o fator de esteira.

Os detalhes da obtenção da equação (6.6) foi vista no capítulo 2

A equação (6.6) foi testada para dados dos rios de montanha com rugosidade relativa D/y variando entre 0,013 a 3,3 e gradiente da linha de energia entre 0,001% a 6,55%, pesquisados por Judd e Peterson[29], Bathurst[4],[6], Thompson et al.[44], Thorne et al.[45] e outros. Os resultados foram comparados com os estimados usando as equações de Thompson et al.[44] (equação 6.2) e Bathurst[6] (equação 6.4). Ver tabela (6.2). A formulação permitiu estimar a resistência com uma media de erro de $\pm 15\%$.

Tabela 6.2 Comparação de erros na estimativa da resistência ao escoamento feita por Aguirre Pe et al., usando equações de outros pesquisadores

Source (1)	River (2)	Data used in present study (3)	Characteristic D (4)	D/d (5)	Slope S (%) (6)	Coefficients in Eq. 13		Deviations in Equations				
						α (7)	β (8)	Thompson and Campbell (1979) (9)	Griffith (1981), (10)	Oral et al. (1981), (11)	Bathurst (1985), (12)	Present work, (13)
Judd and Peterson (1969)	Logan, Utah	18	D_{84}	0.38–1.35	0.83–1.03	5.9	0.33	13.57	84.11	124.99	60.92	3.49
Judd and Peterson (1969)	Fork Creek, Utah	12	D_{84}	0.83–3.33	6.3–6.55	9.1	0.50	48.08	19.83	67.28	66.15	8.13
Judd and Peterson (1969)	Rio Rojo, 81, N.M.	12	D_{84}	0.63–1.47	1.21–1.45	0.21	–1.08	67.45	54.51	36.41	39.62	19.11
Judd and Peterson (1969)	Rio Rojo, 82, N.M.	23	D_{50}	0.26–0.67	2.2–2.81	2.33	–0.77	32.11	24.15	26.95	—	24.46
Bathurst (1977)	Severn, England	30	D_{84}	0.35–0.62	0.001–0.29	5.6	2.80	24.32	23.68	29.90	25.96	21.31
Bathurst (1977)	Tees, U.K.	9	D_{84}	0.76–2.74	0.80–1.74	3.6	0.23	26.33	12.78	43.87	23.09	13.97
Thompson and Campbell (1979)	Several, U.S.	26	D_{84}	0.053–0.34	0.59–5.2	6.15	0.15	15.83	18.57	31.3	—	14.82
Griffiths (1981)	Several, New Zealand	51	D_{50}	0.013–0.56	0.009–1.1	5.85	0.20	19.12	19.24	26.28	—	18.31
Thorne and Zevenbergen (1985)	Boulder Creek, Colo.	12	D_{84}	0.25–0.46	1.43–1.98	7.00	–0.60	28.07	41.78	77.00	30.83	4.29
Bathurst (1985)	Several, U.S.	44	D_{84}	0.087–2.3	0.43–3.73	2.75	–0.05	24.81	29.72	48.37	26.24	20.78

ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM RIOS DE MONTANHA

7.1 GENERALIDADES

Para avaliar as diversas formulações de resistência ao escoamento nos denominados rios de montanha, dispõe-se de dados de medições das velocidades numa estação hidrométrica do rio Sangaban situado acima dos 2700 m. do nível do mar, na região dos Andes Peruanos.

As medições disponíveis para serem usadas na presente avaliação correspondem às feitas entre os anos 1981 e 1987 em um total de 71 medições

A declividade do leito do rio é $i = 0.0193$ m/m , a submersão relativa $0.958 \leq R/D_{84} \leq 2.28$, sendo D_{84} o diâmetro do elemento para o qual o 84% dos elementos da amostra são menores, amostra obtida pelo método da contagem de elementos [3], [4].

Foram usadas as formulações de Hey (equação 2.19), Bathurst (equação 2.20), Thompson e Campbell (equação 2.15), Aguirre e Fuentes (equação 6.6) e outros pesquisadores que posteriormente tem desenvolvido estudos em rios de montanha, tais como:

Ugarte, S. & Mendez, J. (1994), analisaram o comportamento hidráulico de rios de montanha do Chile e propuseram um modelo baseado em incluir a declividade e o número de Froude dentro de uma expressão da forma dada pelo Bathurst [6]:

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = a + \ln \left[\left(\frac{R}{d}\right)^b i^c F_d \right] \quad (7.1)$$

Mediante uma análise de regressão múltipla de dados de rios, obtiveram os coeficientes a , b , c e d , apresentados a seguir:

Cte.	Classificação do Escoamento segundo a Submersão Relativa		
	$R/d_{84} < 1$	$1 < R/d_{84} < 2$	$R/d_{84} > 2$
a	-0.565	-1.9576	-5.0347
b	-0.3478	-0.0036	0.2510
c	-1.3851	-2.2540	-3.1278
d	2.7712	4.5969	6.6020

Garcia Flores, M. (1996), baseado em resultados de experiência em laboratório obteve a equação (7.2) para declividade $0.004 < i \leq 0.0274$, submersão relativa $0.383 \leq y/D_{84} \leq 1.727$ e número de Froude $0.3 < F < 1$,

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = 5.756 \lg\left(\frac{y}{D_{84}}\right) + 2.2794 \quad (7.2)$$

$$n = \frac{0.111 y^{1/6}}{2 \log\left[\frac{y}{D_{84}}\right] + 0.7919} \quad (7.3)$$

As seguintes tabelas e figuras mostram os dados e resultados do cálculo da velocidade e da expressão adimensional de resistência $(8/f)^{1/2}$. Foi feita uma correlação entre os valores da submersão relativa e os de resistência obtendo-se uma curva de ajuste pelo método de regressão logarítmica das medições do rio testado (figuras 7.1, 7.2). Da informação obtida tenta-se achar uma formulação para modelar melhor os valores de velocidade e de resistência medidos no rio, para o qual foram feitas comparações gráficas e estatísticas usando o parâmetro desvio médio absoluto (DMA) para avaliar a eficiência do ajuste das formulações, expresso como:

$$DMA = \frac{1}{n} \left| \sum \frac{U - U'}{U'} \right| \quad (7.4)$$

Onde, U é o valor medido e U' o valor calculado da velocidade. Os resultados dos cálculos do parâmetro são mostrados na tabela (7.5).

DADOS MEDIDOS NO RIO SANGABAN													
No	DATA	I (m/m)	y (m)	ymax (m)	A (m)	P (m)	R (m)	V (m/s)	F	d84 (m)	R/d84	y/d84	(gRi)^1/2 (m/s)
1	28/11/81	0.0193	1.094	1.400	18.070	21.164	0.854	1.259	0.384	0.6	1.423	1.823	0.402
2	21/03/82	0.0193	1.523	2.000	25.890	23.210	1.115	1.687	0.436	0.6	1.859	2.539	0.459
3	22/03/82	0.0193	1.583	1.700	25.280	22.630	1.117	1.380	0.350	0.6	1.862	2.638	0.460
4	23/03/82	0.0193	1.464	1.600	24.800	22.520	1.101	1.290	0.340	0.6	1.835	2.440	0.456
5	24/03/82	0.0193	1.370	1.600	23.340	22.400	1.042	1.440	0.393	0.6	1.737	2.283	0.444
6	25/03/82	0.0193	1.515	1.800	25.760	22.900	1.125	1.580	0.410	0.6	1.875	2.525	0.461
7	25/03/82	0.0193	1.575	1.850	26.780	22.980	1.165	1.710	0.435	0.6	1.942	2.626	0.469
8	26/03/82	0.0193	1.537	1.780	26.130	22.840	1.144	1.840	0.474	0.6	1.907	2.562	0.465
9	02/06/82	0.0193	0.887	1.230	15.085	21.750	0.694	0.620	0.210	0.6	1.156	1.478	0.362
10	03/06/82	0.0193	0.879	1.210	14.945	21.750	0.687	0.605	0.206	0.6	1.145	1.465	0.361
11	05/06/82	0.0193	0.880	1.210	14.965	21.710	0.689	0.605	0.206	0.6	1.149	1.467	0.361
12	05/06/82	0.0193	0.863	1.200	14.665	21.690	0.676	0.561	0.193	0.6	1.127	1.438	0.358
13	07/06/82	0.0193	0.885	1.370	15.050	21.880	0.688	0.612	0.208	0.6	1.146	1.475	0.361
14	09/06/82	0.0193	0.932	1.190	14.915	21.710	0.687	0.627	0.207	0.6	1.145	1.553	0.360
15	11/06/82	0.0193	0.784	1.160	14.460	21.660	0.668	0.584	0.211	0.6	1.113	1.306	0.355
16	11/06/82	0.0193	0.839	1.200	14.260	21.680	0.658	0.548	0.191	0.6	1.096	1.398	0.353
17	12/06/82	0.0193	0.856	1.190	14.545	21.670	0.671	0.561	0.194	0.6	1.119	1.426	0.356
18	17/08/82	0.0193	0.730	1.020	12.410	21.400	0.580	0.534	0.200	0.6	0.967	1.217	0.331
19	18/08/82	0.0193	0.760	1.130	12.925	21.510	0.601	0.520	0.190	0.6	1.001	1.267	0.337
20	19/08/82	0.0193	0.726	1.070	12.335	21.470	0.575	0.523	0.196	0.6	0.958	1.209	0.330
21	20/08/82	0.0193	0.701	1.200	12.750	21.580	0.591	0.520	0.198	0.6	0.985	1.169	0.334
22	02/12/82	0.0193	1.330	1.680	22.610	22.680	0.997	1.215	0.336	0.6	1.662	2.217	0.434
23	03/12/82	0.0193	1.341	1.730	22.790	22.720	1.003	1.216	0.335	0.6	1.672	2.234	0.436
24	04/12/82	0.0193	1.500	2.080	25.500	23.200	1.099	1.682	0.439	0.6	1.832	2.500	0.456
25	06/12/82	0.0193	1.643	2.020	27.935	23.250	1.202	1.884	0.469	0.6	2.003	2.739	0.477
26	07/12/82	0.0193	1.610	1.910	27.365	23.190	1.180	1.747	0.440	0.6	1.967	2.683	0.472
27	08/12/82	0.0193	1.615	2.130	27.475	23.370	1.176	1.817	0.456	0.6	1.959	2.692	0.472
28	09/12/82	0.0193	1.658	2.160	28.185	23.410	1.204	1.795	0.445	0.6	2.007	2.763	0.477
29	25/04/83	0.0193	1.188	1.500	20.193	22.240	0.908	0.881	0.258	0.6	1.513	1.979	0.414
30	26/04/83	0.0193	1.202	1.540	20.430	22.320	0.915	0.874	0.255	0.6	1.526	2.003	0.416
31	27/04/83	0.0193	1.140	1.560	19.435	22.190	0.876	0.820	0.245	0.6	1.460	1.900	0.407
32	28/04/83	0.0193	1.187	1.540	20.175	22.230	0.908	0.826	0.242	0.6	1.513	1.978	0.414
33	29/04/83	0.0193	1.176	1.510	19.990	22.240	0.899	0.812	0.239	0.6	1.498	1.960	0.412
34	30/04/83	0.0193	1.176	1.530	19.990	22.260	0.898	0.828	0.244	0.6	1.497	1.960	0.412
35	02/05/83	0.0193	1.149	1.460	19.285	22.190	0.869	0.774	0.231	0.6	1.448	1.914	0.405
36	04/05/83	0.0193	1.155	1.510	19.635	22.170	0.886	0.778	0.231	0.6	1.476	1.925	0.409
37	25/08/83	0.0193	0.891	1.240	15.140	21.660	0.699	0.619	0.209	0.6	1.165	1.484	0.364
38	26/08/83	0.0193	0.928	1.300	15.770	21.660	0.728	0.577	0.191	0.6	1.213	1.546	0.371
39	27/08/83	0.0193	0.851	1.230	15.035	21.650	0.694	0.539	0.187	0.6	1.157	1.419	0.362
40	10/05/84	0.0193	1.173	1.44	19.935	22.230	0.897	0.856	0.252	0.6	1.495	1.954	0.412
41	25/06/86	0.0193	0.971	1.460	16.510	22.080	0.748	0.530	0.172	0.6	1.246	1.619	0.376
42	26/06/86	0.0193	0.992	1.380	16.870	21.940	0.769	0.530	0.170	0.6	1.282	1.654	0.381
43	31/10/86	0.0193	1.023	1.410	17.395	22.110	0.787	0.602	0.190	0.6	1.311	1.705	0.386
44	31/10/86	0.0193	1.021	1.450	17.360	22.020	0.788	0.595	0.188	0.6	1.314	1.702	0.386
45	01/11/86	0.0193	1.014	1.450	17.245	22.070	0.781	0.597	0.189	0.6	1.302	1.691	0.384
46	01/11/86	0.0193	1.006	1.460	17.105	22.030	0.776	0.584	0.186	0.6	1.294	1.677	0.383
47	22/02/87	0.0193	1.694	2.140	28.790	23.400	1.230	1.650	0.405	0.6	2.051	2.823	0.482
48	22/02/87	0.0193	1.774	2.140	30.150	23.460	1.285	1.480	0.355	0.6	2.142	2.956	0.493
49	23/02/87	0.0193	1.719	2.090	29.230	23.400	1.249	1.510	0.368	0.6	2.082	2.866	0.486
50	24/02/87	0.0193	1.906	2.280	32.400	23.650	1.370	1.780	0.412	0.6	2.283	3.176	0.509
51	24/02/87	0.0193	1.956	2.310	32.150	23.580	1.363	1.780	0.406	0.6	2.272	3.261	0.508
52	26/02/87	0.0193	1.690	2.100	28.720	23.330	1.231	1.450	0.356	0.6	2.052	2.816	0.483
53	26/02/87	0.0193	1.700	2.100	28.900	23.330	1.239	1.450	0.355	0.6	2.065	2.834	0.484
54	07/05/87	0.0193	1.076	1.500	18.300	22.210	0.824	0.760	0.234	0.6	1.373	1.794	0.395
55	08/05/87	0.0193	1.117	1.560	18.990	22.280	0.852	0.720	0.218	0.6	1.421	1.862	0.402
56	08/05/87	0.0193	1.098	1.560	18.670	22.280	0.838	0.730	0.222	0.6	1.397	1.830	0.398
57	09/05/87	0.0193	1.074	1.470	18.250	22.170	0.823	0.750	0.231	0.6	1.372	1.790	0.395
58	09/05/87	0.0193	1.061	1.470	18.040	22.170	0.814	0.770	0.239	0.6	1.356	1.769	0.392
59	11/05/87	0.0193	1.111	1.610	18.890	22.320	0.846	0.750	0.227	0.6	1.411	1.852	0.400
60	11/05/87	0.0193	1.107	1.610	18.820	22.310	0.844	0.760	0.231	0.6	1.406	1.846	0.399
61	19/08/87	0.0193	0.791	1.200	13.550	21.570	0.628	0.520	0.187	0.6	1.047	1.319	0.345
62	19/08/87	0.0193	0.799	1.200	13.590	21.560	0.630	0.500	0.179	0.6	1.051	1.332	0.345
63	20/08/87	0.0193	0.789	1.250	13.400	21.630	0.620	0.500	0.180	0.6	1.033	1.314	0.342
64	20/08/87	0.0193	0.782	1.250	13.300	20.380	0.653	0.490	0.177	0.6	1.088	1.303	0.351

65	21/08/87	0.0193	0.794	1.210	13.495	21.610	0.624	0.490	0.176	0.6	1.041	1.323	0.344
66	21/08/87	0.0193	0.841	1.220	13.500	21.620	0.624	0.490	0.171	0.6	1.041	1.402	0.344
67	10/11/87	0.0193	1.420	1.950	24.440	23.050	1.060	1.170	0.313	0.6	1.767	2.367	0.448
68	10/11/87	0.0193	1.374	1.950	24.350	23.010	1.058	1.180	0.321	0.6	1.764	2.290	0.447
69	11/11/87	0.0193	1.519	1.990	25.820	23.110	1.117	1.310	0.339	0.6	1.862	2.531	0.460
70	11/11/87	0.0193	1.520	1.990	25.840	23.090	1.119	1.270	0.329	0.6	1.865	2.533	0.460
71	12/11/87	0.0193	1.452	1.940	24.690	22.970	1.075	1.130	0.299	0.6	1.791	2.420	0.451

Tabela 7.1 Dados hidrométricos do rio Sangaban, Peru (Fonte: ELECTROPERU S.A)

CALCULOS FEITOS COM BASE ÀS FORMULAÇÕES													
HEY							BATHURST				Thompson & Campbell		
No	R/d84	a	(8/f)^1/2	f	(gRS)^1/2	V	(gRS)^1/2	y/d84	(8/f)^1/2	V	R/d84	(8/f)^1/2	V
1	4.057	12.965	4.057	0.486	0.402	1.630	0.402	1.823	5.466	2.197	4.057	2.240	0.900
2	4.778	13.334	4.778	0.350	0.459	2.195	0.459	2.539	6.274	2.882	4.778	2.981	1.369
3	4.656	12.664	4.656	0.369	0.460	2.140	0.460	2.638	6.368	2.927	4.656	2.985	1.372
4	4.586	12.481	4.586	0.380	0.456	2.093	0.456	2.440	6.177	2.819	4.586	2.945	1.344
5	4.493	12.700	4.493	0.396	0.444	1.995	0.444	2.283	6.015	2.670	4.493	2.790	1.238
6	4.711	12.866	4.711	0.360	0.461	2.173	0.461	2.525	6.261	2.888	4.711	3.005	1.386
7	4.792	12.834	4.792	0.348	0.469	2.250	0.469	2.626	6.356	2.984	4.792	3.104	1.457
8	4.731	12.753	4.731	0.357	0.465	2.201	0.465	2.562	6.296	2.929	4.731	3.052	1.420
9	3.61	13.288	3.610	0.614	0.362	1.307	0.362	1.478	4.954	1.794	3.610	1.689	0.612
10	3.582	13.258	3.582	0.624	0.361	1.291	0.361	1.465	4.932	1.778	3.582	1.665	0.600
11	3.587	13.245	3.587	0.622	0.361	1.295	0.361	1.467	4.936	1.782	3.587	1.673	0.604
12	3.548	13.291	3.548	0.635	0.358	1.269	0.358	1.438	4.886	1.747	3.548	1.624	0.581
13	3.679	13.781	3.679	0.591	0.361	1.327	0.361	1.475	4.949	1.785	3.679	1.668	0.602
14	3.569	13.190	3.569	0.628	0.360	1.286	0.360	1.553	5.074	1.829	3.569	1.665	0.600
15	3.501	13.203	3.501	0.653	0.355	1.244	0.355	1.306	4.651	1.653	3.501	1.591	0.565
16	3.502	13.406	3.502	0.652	0.353	1.235	0.353	1.398	4.818	1.699	3.502	1.554	0.548
17	3.53	13.287	3.530	0.642	0.356	1.258	0.356	1.426	4.866	1.734	3.530	1.605	0.572
18	3.167	13.253	3.167	0.798	0.331	1.049	0.331	1.217	4.479	1.483	3.167	1.243	0.412
19	3.305	13.535	3.305	0.733	0.337	1.114	0.337	1.267	4.578	1.543	3.305	1.329	0.448
20	3.188	13.494	3.188	0.787	0.330	1.051	0.330	1.209	4.464	1.471	3.188	1.221	0.402
21	3.322	13.866	3.322	0.725	0.334	1.111	0.334	1.169	4.381	1.465	3.322	1.288	0.431
22	4.456	13.077	4.456	0.403	0.434	1.935	0.434	2.217	5.943	2.581	4.456	2.667	1.158
23	4.489	13.172	4.489	0.397	0.436	1.955	0.436	2.234	5.962	2.597	4.489	2.684	1.169
24	4.783	13.561	4.783	0.350	0.456	2.181	0.456	2.500	6.236	2.843	4.783	2.940	1.340
25	4.91	13.067	4.910	0.332	0.477	2.341	0.477	2.739	6.459	3.079	4.910	3.191	1.521
26	4.837	12.912	4.837	0.342	0.472	2.285	0.472	2.683	6.409	3.028	4.837	3.140	1.483
27	4.914	13.377	4.914	0.331	0.472	2.317	0.472	2.692	6.417	3.026	4.914	3.129	1.476
28	4.965	13.336	4.965	0.325	0.477	2.369	0.477	2.763	6.481	3.093	4.965	3.197	1.525
29	4.213	12.995	4.213	0.451	0.414	1.746	0.414	1.979	5.667	2.348	4.213	2.408	0.998
30	4.247	13.070	4.247	0.444	0.416	1.767	0.416	2.003	5.695	2.370	4.247	2.430	1.011
31	4.183	13.306	4.183	0.457	0.407	1.702	0.407	1.900	5.567	2.266	4.183	2.310	0.940
32	4.232	13.105	4.232	0.447	0.414	1.754	0.414	1.978	5.665	2.347	4.232	2.407	0.997
33	4.201	13.064	4.201	0.453	0.412	1.732	0.412	1.960	5.642	2.326	4.201	2.380	0.981
34	4.21	13.122	4.210	0.451	0.412	1.735	0.412	1.960	5.642	2.325	4.210	2.378	0.980
35	4.119	13.064	4.119	0.472	0.405	1.670	0.405	1.914	5.585	2.264	4.119	2.288	0.928
36	4.176	13.124	4.176	0.459	0.409	1.709	0.409	1.925	5.599	2.291	4.176	2.340	0.958
37	3.629	13.289	3.629	0.607	0.364	1.320	0.364	1.484	4.964	1.805	3.629	1.709	0.621
38	3.734	13.316	3.734	0.574	0.371	1.385	0.371	1.546	5.063	1.879	3.734	1.815	0.674
39	3.612	13.282	3.612	0.613	0.362	1.309	0.362	1.419	4.854	1.759	3.612	1.692	0.613
40	4.161	12.880	4.161	0.462	0.412	1.714	0.412	1.954	5.636	2.321	4.161	2.374	0.978
41	3.867	13.695	3.867	0.535	0.376	1.454	0.376	1.619	5.175	1.946	3.867	1.885	0.709
42	3.871	13.338	3.871	0.534	0.381	1.476	0.381	1.654	5.228	1.994	3.871	1.959	0.747
43	3.926	13.332	3.926	0.519	0.386	1.514	0.386	1.705	5.303	2.046	3.926	2.020	0.779
44	3.95	13.441	3.950	0.513	0.386	1.525	0.386	1.702	5.298	2.046	3.950	2.025	0.782
45	3.936	13.478	3.936	0.517	0.384	1.513	0.384	1.691	5.282	2.030	3.936	2.002	0.770

46	3.93	13.534	3.930	0.518	0.383	1.506	0.383	1.677	5.262	2.016	3.930	1.985	0.761
47	4.994	13.207	4.994	0.321	0.482	2.409	0.482	2.823	6.533	3.151	4.994	3.258	1.572
48	5.067	13.027	5.067	0.312	0.493	2.498	0.493	2.956	6.645	3.276	5.067	3.382	1.667
49	5.001	13.047	5.001	0.320	0.486	2.431	0.486	2.866	6.570	3.193	5.001	3.301	1.604
50	5.223	13.025	5.223	0.293	0.509	2.658	0.509	3.176	6.821	3.472	5.223	3.563	1.814
51	5.225	13.098	5.225	0.293	0.508	2.653	0.508	3.261	6.885	3.496	5.225	3.550	1.803
52	4.98	13.127	4.980	0.323	0.483	2.403	0.483	2.816	6.527	3.150	4.980	3.260	1.573
53	4.991	13.101	4.991	0.321	0.484	2.416	0.484	2.834	6.542	3.167	4.991	3.277	1.586
54	4.05	13.397	4.050	0.488	0.395	1.599	0.395	1.794	5.426	2.142	4.050	2.144	0.846
55	4.137	13.420	4.137	0.467	0.402	1.661	0.402	1.862	5.517	2.215	4.137	2.236	0.898
56	4.109	13.492	4.109	0.474	0.398	1.636	0.398	1.830	5.475	2.180	4.109	2.189	0.872
57	4.033	13.317	4.033	0.492	0.395	1.591	0.395	1.790	5.421	2.139	4.033	2.141	0.845
58	4.014	13.365	4.014	0.497	0.392	1.575	0.392	1.769	5.392	2.115	4.014	2.110	0.828
59	4.149	13.584	4.149	0.465	0.400	1.660	0.400	1.852	5.504	2.202	4.149	2.216	0.887
60	4.144	13.598	4.144	0.466	0.399	1.655	0.399	1.846	5.496	2.195	4.144	2.208	0.882
61	3.425	13.601	3.425	0.682	0.345	1.181	0.345	1.319	4.676	1.612	3.425	1.438	0.496
62	3.431	13.587	3.431	0.680	0.345	1.185	0.345	1.332	4.700	1.623	3.431	1.447	0.500
63	3.433	13.837	3.433	0.679	0.342	1.175	0.342	1.314	4.667	1.598	3.433	1.404	0.481
64	3.52	13.613	3.520	0.646	0.351	1.237	0.351	1.303	4.647	1.633	3.520	1.534	0.539
65	3.422	13.662	3.422	0.683	0.344	1.176	0.344	1.323	4.683	1.610	3.422	1.424	0.489
66	3.428	13.698	3.428	0.681	0.344	1.178	0.344	1.402	4.826	1.658	3.428	1.423	0.489
67	4.674	13.440	4.674	0.366	0.448	2.093	0.448	2.367	6.103	2.733	4.674	2.839	1.271
68	4.67	13.449	4.670	0.367	0.447	2.089	0.447	2.290	6.022	2.694	4.670	2.833	1.268
69	4.777	13.306	4.777	0.351	0.460	2.196	0.460	2.531	6.266	2.881	4.777	2.986	1.372
70	4.78	13.299	4.780	0.350	0.460	2.199	0.460	2.533	6.269	2.884	4.780	2.990	1.376
71	4.693	13.361	4.693	0.363	0.451	2.116	0.451	2.420	6.157	2.776	4.693	2.877	1.297

Tabela 7.2 Resultados dos calculos com base às equações de Hey, Bathurst e Thompson & Campbell para o rio Sangaban (Peru)

CALCULOS FEITOS COM BASE ÀS FORMULAÇÕES											
AGUIRRE PE & FUENTES							UGARTE & MENDEZ				
No	y/d84	A	B	(gRi)^1/2	(8/f)^1/2	V	F	y/d84	(gRi)^1/2	(8/f)^1/2	V
1	1.823	6.8	0.3	0.402	3.213	1.291	0.384	1.823	0.402	2.545	1.023
2	2.539	6.8	0.3	0.459	3.913	1.797	0.436	2.539	0.459	3.129	1.437
3	2.638	6.8	0.3	0.460	3.996	1.837	0.350	2.638	0.460	2.117	0.973
4	2.440	6.8	0.3	0.456	3.827	1.747	0.340	2.440	0.456	1.986	0.907
5	2.283	6.8	0.3	0.444	3.684	1.635	0.393	2.283	0.444	2.646	1.174
6	2.525	6.8	0.3	0.461	3.901	1.799	0.410	2.525	0.461	2.840	1.310
7	2.626	6.8	0.3	0.469	3.986	1.871	0.435	2.626	0.469	3.114	1.462
8	2.562	6.8	0.3	0.465	3.932	1.829	0.474	2.562	0.465	3.507	1.631
9	1.478	6.8	0.3	0.362	2.792	1.011	0.210	1.478	0.362	-0.228	-0.083
10	1.465	6.8	0.3	0.361	2.775	1.000	0.206	1.465	0.361	-0.320	-0.115
11	1.467	6.8	0.3	0.361	2.777	1.003	0.206	1.467	0.361	-0.323	-0.117
12	1.438	6.8	0.3	0.358	2.738	0.979	0.193	1.438	0.358	-0.624	-0.223
13	1.475	6.8	0.3	0.361	2.788	1.006	0.208	1.475	0.361	-0.283	-0.102
14	1.553	6.8	0.3	0.360	2.889	1.041	0.207	1.553	0.360	-0.289	-0.104
15	1.306	6.8	0.3	0.355	2.553	0.907	0.211	1.306	0.355	-0.218	-0.077
16	1.398	6.8	0.3	0.353	2.684	0.947	0.191	1.398	0.353	-0.667	-0.235
17	1.426	6.8	0.3	0.356	2.722	0.970	0.194	1.426	0.356	-0.605	-0.215
18	1.217	6.8	0.3	0.331	2.421	0.802	0.200	1.217	0.331	-0.466	-0.154
19	1.267	6.8	0.3	0.337	2.497	0.842	0.190	1.267	0.337	-0.682	-0.230
20	1.209	6.8	0.3	0.330	2.410	0.794	0.196	1.209	0.330	-0.548	-0.181
21	1.169	6.8	0.3	0.334	2.347	0.785	0.198	1.169	0.334	-0.497	-0.166
22	2.217	6.8	0.3	0.434	3.621	1.573	0.336	2.217	0.434	1.932	0.839
23	2.234	6.8	0.3	0.436	3.638	1.585	0.335	2.234	0.436	1.918	0.835
24	2.500	6.8	0.3	0.456	3.879	1.769	0.439	2.500	0.456	3.152	1.437
25	2.739	6.8	0.3	0.477	4.078	1.944	0.469	2.739	0.477	2.495	1.189
26	2.683	6.8	0.3	0.472	4.033	1.905	0.440	2.683	0.472	3.162	1.494
27	2.692	6.8	0.3	0.472	4.040	1.905	0.456	2.692	0.472	3.336	1.573
28	2.763	6.8	0.3	0.477	4.097	1.955	0.445	2.763	0.477	2.147	1.024
29	1.979	6.8	0.3	0.414	3.383	1.402	0.258	1.979	0.414	0.715	0.296
30	2.003	6.8	0.3	0.416	3.408	1.418	0.255	2.003	0.416	0.651	0.271
31	1.900	6.8	0.3	0.407	3.299	1.343	0.245	1.900	0.407	0.479	0.195
32	1.978	6.8	0.3	0.414	3.382	1.401	0.242	1.978	0.414	0.421	0.174
33	1.960	6.8	0.3	0.412	3.362	1.386	0.239	1.960	0.412	0.363	0.150
34	1.960	6.8	0.3	0.412	3.362	1.386	0.244	1.960	0.412	0.453	0.187
35	1.914	6.8	0.3	0.405	3.314	1.343	0.231	1.914	0.405	0.197	0.080
36	1.925	6.8	0.3	0.409	3.325	1.361	0.231	1.925	0.409	0.208	0.085
37	1.484	6.8	0.3	0.364	2.800	1.018	0.209	1.484	0.364	-0.245	-0.089
38	1.546	6.8	0.3	0.371	2.880	1.069	0.191	1.546	0.371	-0.662	-0.245
39	1.419	6.8	0.3	0.362	2.712	0.983	0.187	1.419	0.362	-0.777	-0.282
40	1.954	6.8	0.3	0.412	3.357	1.382	0.252	1.954	0.412	0.612	0.252
41	1.619	6.8	0.3	0.376	2.972	1.118	0.172	1.619	0.376	-1.158	-0.435
42	1.654	6.8	0.3	0.381	3.015	1.150	0.170	1.654	0.381	-1.207	-0.460
43	1.705	6.8	0.3	0.386	3.077	1.187	0.190	1.705	0.386	-0.692	-0.267

44	1.702	6.8	0.3	0.386	3.073	1.187	0.188	1.702	0.386	-0.741	-0.286
45	1.691	6.8	0.3	0.384	3.059	1.176	0.189	1.691	0.384	-0.711	-0.273
46	1.677	6.8	0.3	0.383	3.043	1.166	0.186	1.677	0.383	-0.793	-0.304
47	2.823	6.8	0.3	0.482	4.144	1.999	0.405	2.823	0.482	1.526	0.736
48	2.956	6.8	0.3	0.493	4.245	2.093	0.355	2.956	0.493	0.667	0.329
49	2.866	6.8	0.3	0.486	4.177	2.030	0.368	2.866	0.486	0.894	0.435
50	3.176	6.8	0.3	0.509	4.405	2.242	0.412	3.176	0.509	1.664	0.847
51	3.261	6.8	0.3	0.508	4.463	2.267	0.406	3.261	0.508	1.576	0.800
52	2.816	6.8	0.3	0.483	4.139	1.997	0.356	2.816	0.483	0.680	0.328
53	2.834	6.8	0.3	0.484	4.153	2.010	0.355	2.834	0.484	0.661	0.320
54	1.794	6.8	0.3	0.395	3.180	1.255	0.234	1.794	0.395	0.263	0.104
55	1.862	6.8	0.3	0.402	3.256	1.307	0.218	1.862	0.402	-0.071	-0.029
56	1.830	6.8	0.3	0.398	3.221	1.282	0.222	1.830	0.398	0.031	0.012
57	1.790	6.8	0.3	0.395	3.175	1.253	0.231	1.790	0.395	0.207	0.082
58	1.769	6.8	0.3	0.392	3.151	1.236	0.239	1.769	0.392	0.355	0.139
59	1.852	6.8	0.3	0.400	3.245	1.298	0.227	1.852	0.400	0.128	0.051
60	1.846	6.8	0.3	0.399	3.238	1.293	0.231	1.846	0.399	0.197	0.079
61	1.319	6.8	0.3	0.345	2.572	0.887	0.187	1.319	0.345	-0.774	-0.267
62	1.332	6.8	0.3	0.345	2.591	0.895	0.179	1.332	0.345	-0.977	-0.338
63	1.314	6.8	0.3	0.342	2.565	0.878	0.180	1.314	0.342	-0.946	-0.324
64	1.303	6.8	0.3	0.351	2.550	0.896	0.177	1.303	0.351	-1.020	-0.358
65	1.323	6.8	0.3	0.344	2.578	0.886	0.176	1.323	0.344	-1.054	-0.362
66	1.402	6.8	0.3	0.344	2.690	0.924	0.171	1.402	0.344	-1.188	-0.408
67	2.367	6.8	0.3	0.448	3.762	1.685	0.313	2.367	0.448	1.608	0.720
68	2.290	6.8	0.3	0.447	3.690	1.651	0.321	2.290	0.447	1.723	0.771
69	2.531	6.8	0.3	0.460	3.906	1.795	0.339	2.531	0.460	1.973	0.907
70	2.533	6.8	0.3	0.460	3.908	1.798	0.329	2.533	0.460	1.829	0.841
71	2.420	6.8	0.3	0.451	3.809	1.718	0.299	2.420	0.451	1.397	0.630

Tabela 7.3 Resultados dos calculos com base às equações de Aguirre & Fuentes e Ugarte e Mendez para o rio Sangaban (Peru)

CALCULOS FEITOS COM BASE AS FORMULAÇÕES											
GARCIA FLORES								AJUSTE			
No	y/d84	(gRi)^1/2	0.11 (y)^1/6	m	n	V	(8/f)^1/2	y/d84	(gRi)^1/2	(8/f)^1/2	V
1	1.823	0.402	0.113	1.314	0.086	1.457	3.626	1.823	0.402	2.951	1.186
2	2.539	0.459	0.119	1.601	0.074	2.008	4.372	2.539	0.459	3.925	1.803
3	2.638	0.460	0.120	1.635	0.073	2.039	4.436	2.638	0.460	4.039	1.856
4	2.440	0.456	0.118	1.567	0.075	1.961	4.298	2.440	0.456	3.809	1.738
5	2.283	0.444	0.117	1.509	0.078	1.841	4.147	2.283	0.444	3.612	1.604
6	2.525	0.461	0.119	1.597	0.075	2.016	4.370	2.525	0.461	3.910	1.803
7	2.626	0.469	0.120	1.630	0.073	2.094	4.460	2.626	0.469	4.024	1.889
8	2.562	0.465	0.119	1.609	0.074	2.049	4.406	2.562	0.465	3.952	1.838
9	1.478	0.362	0.109	1.132	0.096	1.131	3.124	1.478	0.362	2.333	0.845
10	1.465	0.361	0.109	1.124	0.097	1.118	3.102	1.465	0.361	2.307	0.832
11	1.467	0.361	0.109	1.125	0.097	1.122	3.106	1.467	0.361	2.311	0.834
12	1.438	0.358	0.108	1.107	0.098	1.094	3.058	1.438	0.358	2.251	0.805
13	1.475	0.361	0.109	1.130	0.096	1.124	3.116	1.475	0.361	2.327	0.839
14	1.553	0.360	0.110	1.174	0.093	1.157	3.210	1.553	0.360	2.478	0.893
15	1.306	0.355	0.107	1.024	0.104	1.019	2.867	1.306	0.355	1.968	0.699
16	1.398	0.353	0.108	1.083	0.100	1.055	2.991	1.398	0.353	2.169	0.765
17	1.426	0.356	0.108	1.100	0.098	1.083	3.039	1.426	0.356	2.227	0.793
18	1.217	0.331	0.105	0.962	0.109	0.882	2.664	1.217	0.331	1.759	0.583
19	1.267	0.337	0.106	0.998	0.106	0.930	2.759	1.267	0.337	1.879	0.634
20	1.209	0.330	0.105	0.957	0.110	0.873	2.648	1.209	0.330	1.742	0.574
21	1.169	0.334	0.105	0.928	0.113	0.867	2.593	1.169	0.334	1.642	0.549
22	2.217	0.434	0.116	1.483	0.078	1.766	4.066	2.217	0.434	3.526	1.531
23	2.234	0.436	0.117	1.490	0.078	1.779	4.084	2.234	0.436	3.549	1.546
24	2.500	0.456	0.119	1.588	0.075	1.977	4.336	2.500	0.456	3.880	1.769
25	2.739	0.477	0.121	1.667	0.072	2.170	4.551	2.739	0.477	4.149	1.978
26	2.683	0.472	0.120	1.649	0.073	2.128	4.504	2.683	0.472	4.088	1.931
27	2.692	0.472	0.120	1.652	0.073	2.125	4.507	2.692	0.472	4.098	1.932
28	2.763	0.477	0.121	1.675	0.072	2.179	4.567	2.763	0.477	4.175	1.992
29	1.979	0.414	0.114	1.385	0.082	1.579	3.809	1.979	0.414	3.193	1.323
30	2.003	0.416	0.114	1.395	0.082	1.596	3.835	2.003	0.416	3.227	1.343
31	1.900	0.407	0.113	1.350	0.084	1.512	3.715	1.900	0.407	3.073	1.251
32	1.978	0.414	0.114	1.384	0.083	1.578	3.808	1.978	0.414	3.190	1.322
33	1.960	0.412	0.114	1.376	0.083	1.561	3.785	1.960	0.412	3.163	1.304
34	1.960	0.412	0.114	1.376	0.083	1.560	3.785	1.960	0.412	3.163	1.304
35	1.914	0.405	0.114	1.356	0.084	1.509	3.723	1.914	0.405	3.094	1.254
36	1.925	0.409	0.114	1.361	0.084	1.533	3.745	1.925	0.409	3.110	1.273
37	1.484	0.364	0.109	1.135	0.096	1.140	3.135	1.484	0.364	2.345	0.853
38	1.546	0.371	0.110	1.170	0.094	1.200	3.233	1.546	0.371	2.465	0.915
39	1.419	0.362	0.108	1.096	0.099	1.104	3.046	1.419	0.362	2.212	0.802
40	1.954	0.412	0.114	1.374	0.083	1.556	3.779	1.954	0.412	3.155	1.299
41	1.619	0.376	0.110	1.210	0.091	1.253	3.333	1.619	0.376	2.600	0.978
42	1.654	0.381	0.111	1.229	0.090	1.292	3.388	1.654	0.381	2.664	1.016
43	1.705	0.386	0.111	1.256	0.089	1.333	3.457	1.705	0.386	2.754	1.062

44	1.702	0.386	0.111	1.254	0.089	1.334	3.454	1.702	0.386	2.748	1.061
45	1.691	0.384	0.111	1.248	0.089	1.321	3.437	1.691	0.384	2.728	1.049
46	1.677	0.383	0.111	1.241	0.090	1.310	3.418	1.677	0.383	2.704	1.036
47	2.823	0.482	0.121	1.693	0.072	2.228	4.618	2.823	0.482	4.237	2.044
48	2.956	0.493	0.122	1.733	0.070	2.330	4.725	2.956	0.493	4.373	2.156
49	2.866	0.486	0.121	1.706	0.071	2.262	4.654	2.866	0.486	4.282	2.081
50	3.176	0.509	0.124	1.796	0.069	2.488	4.889	3.176	0.509	4.585	2.334
51	3.261	0.508	0.124	1.819	0.068	2.501	4.925	3.261	0.508	4.662	2.368
52	2.816	0.483	0.121	1.691	0.072	2.227	4.614	2.816	0.483	4.231	2.041
53	2.834	0.484	0.121	1.697	0.071	2.241	4.629	2.834	0.484	4.249	2.057
54	1.794	0.395	0.112	1.299	0.086	1.411	3.575	1.794	0.395	2.902	1.146
55	1.862	0.402	0.113	1.332	0.085	1.470	3.662	1.862	0.402	3.012	1.209
56	1.830	0.398	0.113	1.317	0.086	1.442	3.621	1.830	0.398	2.962	1.179
57	1.790	0.395	0.112	1.297	0.087	1.409	3.570	1.790	0.395	2.896	1.143
58	1.769	0.392	0.112	1.287	0.087	1.390	3.543	1.769	0.392	2.862	1.123
59	1.852	0.400	0.113	1.327	0.085	1.460	3.648	1.852	0.400	2.997	1.199
60	1.846	0.399	0.113	1.324	0.085	1.454	3.640	1.846	0.399	2.986	1.193
61	1.319	0.345	0.107	1.032	0.103	0.985	2.858	1.319	0.345	1.998	0.689
62	1.332	0.345	0.107	1.041	0.103	0.994	2.878	1.332	0.345	2.027	0.700
63	1.314	0.342	0.107	1.029	0.104	0.973	2.844	1.314	0.342	1.987	0.680
64	1.303	0.351	0.107	1.022	0.104	1.002	2.853	1.303	0.351	1.962	0.689
65	1.323	0.344	0.107	1.035	0.103	0.983	2.860	1.323	0.344	2.006	0.690
66	1.402	0.344	0.108	1.086	0.099	1.021	2.971	1.402	0.344	2.178	0.748
67	2.367	0.448	0.118	1.540	0.076	1.890	4.220	2.367	0.448	3.719	1.666
68	2.290	0.447	0.117	1.511	0.077	1.862	4.162	2.290	0.447	3.621	1.620
69	2.531	0.460	0.119	1.598	0.074	2.008	4.368	2.531	0.460	3.916	1.800
70	2.533	0.460	0.119	1.599	0.074	2.011	4.371	2.533	0.460	3.919	1.803
71	2.420	0.451	0.118	1.560	0.076	1.924	4.267	2.420	0.451	3.784	1.706

$$m = 2\log(y/d84)+0.7919$$

Tabela 7.4 Resultados dos calculos com base às equações de Garcia e a equação de Ajuste para o o rio Sangaban (Peru)

Figura 7.1 Relação entre $(8/f)^{1/2}$ e a submersão relativa (R/D_{84})

Figura 7.2 Relação entre $(8/f)^{1/2}$ e a submersão relativa (y/D_{84})

Figura 7.3 Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Hey

Figura 7.4 Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Bathurst

Figura 7.5 Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Aguirre e Fuentes

Figura 7.6 Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Thompson e Campbell

Figura 7.7 Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Garcia

Figura 7.8 Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. de Ugarte e Mendez

Figura 7.9 Relação entre velocidades média medida e calculada pela Eq. De Ajuste

Figura 7.10 Relação entre a função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Hey

Figura 7.11 Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Bathurst

Figura 7.12 Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Aguirre e F.

Figura 7.13 Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Thompson e Campbell

Figura 7.14 Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Garcia

Figura 7.15 Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Ugarte e Mendez

Figura 7.16 Relação entre função de resistência $(8/f)^{1/2}$ com base na velocidade média medida e $(8/f)^{1/2}$ calculada pela Eq. de Ajuste.

Figura 7.17 Medições de velocidades no rio Sangaban (rio de montanha, Peru)

Figura 7.18 Escoamento do Rio Sangaban (Peru)

Figura 7.19 Rio Sangaban (Peru), aprecia-se os grandes elementos de rugosidade no leito

Figura 7.20 Rio Sangaban (Peru), escoamento no regime subcrítico

7.2 RESULTADOS

Nas figuras (7.1) e (7.2) apresentam-se as relações entre os valores do coeficiente adimensional de resistência $(8/f)^{1/2}$ obtidos das diferentes formulações dos pesquisadores e os da submersão relativa. A curva de ajuste, obtida mediante o método de regressão logarítmica para o cálculo da resistência ao escoamento, é expressa como:

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = 6.78 \lg\left(\frac{R}{d_{84}}\right) + 1.182 \quad (7.5)$$

O coeficiente de determinação para a curva de ajuste foi $R^2 = 0.7945$ e coeficiente de correlação $R = 0.89$

Na tabela 7.4 apresenta-se os resultados das velocidades e do coeficiente de resistência obtidos com base na equação de ajuste (7.5) e confrontados aos valores medidos como mostrados nas figuras (7.9) e (7.16).

Os valores calculados das velocidades e dos coeficientes de resistência que se aproximaram dos medidos foram obtidos pela equação (2.15) desenvolvida por Thompson e Campbell . A estimativa da velocidade teve um erro máximo de 25 % com respeito aos valores medidos.

Segundo a classificação feita pelo Bathurst [6], a rugosidade do rio estudado ficaria na região da rugosidade intermediária como dada pela figura (2.11). A equação (2.20) usada para o cálculo do coeficiente de resistência ao escoamento apresentada na tabela (7.2) não seria válida para a faixa dos valores de submersão analisados no rio Sangaban.

Da figura (7.5) tem-se uma boa aproximação das velocidades calculadas em função da equação de resistência (6.6) desenvolvida por Aguirre e Fuentes, duas linhas na figura mostram os limites de erro de até ± 25 %.

As velocidades calculadas para os dados testados em função das formulações de resistência desenvolvidas pelo Hey (equação 2.19) e Garcia (equação 7.2) do tipo logarítmica, tiveram erros maiores do que 25% como mostrados nas figuras (7.3) e (7.7) respectivamente.

A equação (7.1) modelada por Ugarte e Mendez incluindo a declividade (i) e o número de Froude (F) forneceu resultados muito baixos da expressão $(8/f)^{1/2}$, evidenciando uma superestimação da resistência ao escoamento para valores de

submersão relativa $(R/D_{84}) > 1.4$. Para valores de $(R/D_{84}) < 1.4$ não pode ser feita uma análise devido ao fato das formulações terem estimado valores negativos de $(8/f)^{1/2}$.

EQUAÇÃO	DMA
HEY Equação (2.19)	0.464
BATHURST Equação (2.20)	0.599
THOMPSON & CAMPBELL Equação (2.15)	0.016
AGUIRRE PE & FUENTES Equação (6.6)	0.328
UGARTE & MENDEZ Equação (7.1)	0.482
GARCIA FLORES Equação (7.2)	0.399
AJUSTE Equação (7.5)	0.009

Tabela 7.5 Resultados do cálculo do desvio médio absoluto (DMA) da equação (7.4) para o rio Sangaban.

Os resultados do cálculo do desvio médio absoluto (tabela 7.5) calculados com base nas velocidades medidas e calculadas mostram que existe um maior desvio na formulação de Bathurst (DMA = 0.599) e uma maior aproximação usando a equação (2.15) de Thompson e Campbell (DMA = 0.016). Para os valores de velocidades obtidos da equação de ajuste (7.5) o desvio médio absoluto foi de 0.009.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

8.1 CONCLUSOES

Da pesquisa bibliográfica desenvolvida para avaliar a resistência ao escoamento em canais de fundo fixo sem o transporte de sedimentos, chega-se as seguintes conclusões:

A função de resistência $(8/f)^{1/2}$ confrontada graficamente com a submersão relativa permite evidenciar o aumento proporcional entre ambas expressões adimensionais, tem-se então que para baixos valores de $(8/f)^{1/2}$ a resistência ao escoamento cresce e em conseqüência a velocidade diminui. Cabe ressaltar o trabalho desenvolvido por Bathurst [6], para a delimitação das regiões de rugosidade de pequena, intermediária e grande escala (figura 2.11)

O estudo da resistência ao escoamento em rios de montanha, que foi um dos objetivos da presente dissertação, apresentou as formulações desenvolvidas a partir da lei logarítmica de distribuição de velocidades e a equação (6.6) de Aguirre e Fuentes que considera o efeito de esteira no perfil da distribuição de velocidades. A pesquisa bibliográfica mostra que não existe uma equação que defina a resistência ao escoamento para todas as condições de escoamento em canais.

A experimentação em modelo hidráulico permite evidenciar os efeitos da distribuição, tamanho e forma dos elementos na avaliação da resistência ao escoamento, tendo-se que o aumento na expressão $(ab/(x(e+b)))$, denominada densidade de rugosidade, incrementa a resistência ao escoamento. A equação (5.9) é obtida com base nos dados experimentais para relacionar o Parâmetro de Rugosidade e o Desvio Padrão do Perfil de Rugosidade, este último definido matematicamente na equação (5.6).

Cabe mencionar que para fins práticos, uma caracterização da rugosidade de grande escala pode ser aproximada tendo-se uma quantidade de elementos cilíndricos e usando as equações do capítulo 5 para a estimativa da sua resistência ao escoamento.

A equação (7.5) obtida no presente estudo mediante ajuste dos dados medidos e a equação (2.15) de Thompson e Campbell proporcionaram uma boa aproximação da expressão $(8/f)^{1/2}$ e em consequência definiram melhor a resistência ao escoamento no rio testado, obtendo-se velocidades com um erro máximo do $\pm 25\%$.

8.2 SUGESTÕES

Para fins práticos de estimativa da Resistência ao Escoamento, qualquer que seja o objetivo, sugere-se o uso das investigações e formulações da bibliografia existente desenvolvidas para características hidráulicas semelhantes tais como declividade do canal e a submersão relativa.

No Peru existem rios de grandes declividades maiores do que 5% chamados "quebradas" localizados nas zonas altas das montanhas. Sugere-se a realização de um trabalho de pesquisa que permita a estimativa da resistência ao escoamento e das velocidade. Este tipo de escoamento natural faz parte com frequência dos projetos de aproveitamento hidroenergéticos

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **AGUIRRE, J. & FUENTES, R.** Una formula para la fricción em escurrimientos macrorugosos a superficie libre. *In: CONGRESO LATINOAMERICANO de HIDRÁULICA, AIRH*, 12º, São Paulo, SP., 1986. *Memorias*. São Paulo: AIRH, 1986. 1v., p.86-89.
2. **AGUIRRE, J. & FUENTES, R.** Un modelo para la fricción en escurrimiento en canales com macrorugosidades uniformes y compuestas. *In: CONGRESO LATINOAMERICANO de HIDRÁULICA, AIRH*, 13º, Habana, Cuba, 1988. *Memórias*. Habana: AIRH, 1988. V.1, p.55-66.
3. **AGUIRRE, J. & FUENTES, R.** Resistance to flow in steep rough streams. *J.HYDR.ENG., ASCE*, v.116, n.11, p.1374-1387, Nov.1990.
4. **BATHURST, J.C.** Flow resistance of large scale roughness. *J.HYDR.DIV., ASCE*, Ser.HY, n.12, p.1587-1603, Dec.1978.
5. **BATHURST, J.C.; RUH-MING, L. & SIMONS, D.B.** Resistance equation for large-scale roughness. *J.HYDR.DIV., ASCE*, v.107, Ser.HY, n.12, p.1593-1613, Dec.1981.
6. **BATHURST, J.C.** Flow resistance estimation in mountain rivers. *J.HYDR.ENG., ASCE*, v.11, n.4, p.625-643, Apr.1985.
7. **BATHURST, J.C.** Slope-area discharge gaging in mountain rivers. *J.HYDR.ENG., ASCE*, v.112, n.5, p.376-391, May 1986.
8. **BATHURST, J.C.** Discussion of estimation mean velocity in mountain rivers by Thorne, C.R. & Zvenbergen, L.W. *J.HYDR.ENG., ASCE*, v.113, n.4, p.533-556, Apr.1987.
9. **BAYAZIT, M.** Free surface flow in a channel of large relative roughness. *J.HYDR.RES., ASCE*, v.14, n.2, p.115-125, 1976.
10. **BEN-CHIE, Y.** Discussion of large-scale roughness open channel flow by Herbich, J.B. & Shulits, S., *J.HYDR.DIV., ASCE*, v.91, Ser.HY, n.5, p.257-262, Sept.1965.
11. **CHANG, HAWARD.H.** *Fluvial Processes in River Engineering*. San Diego, USA, Jhon Wiley & Sons, Inc., . 432pp 1988.
12. **CHOW, V.T.** *Open Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 680pp.1959.
13. **COLEMAN, N. & ALONSO, C.V.** Two dimensional channel flows over rough surface. *J.HYDR.DIV., ASCE*, v.109, Ser.HY, n.2, Febr.1983.
14. **COLOSIMO, V.; COPERTINO, V.A. & VELTRI, M.** Friction factor in gravel-bed rivers. *J.HYDR.ENG., ASCE*, v.114, n.8, p.861-876, Aug.1988.

15. **EINSTEIN, A.H. & BARBAROSSA, N.** River channel roughness. *TRANS.ASCE*, v.117, Paper n.2528, p.1121-1146, 1952.
16. **FERRO, V. & BAIAMONTE, G.** Discussion of Darcy-Weisbach roughness coefficients for garvel and cobble surgace by Gilley, J.E.; Kottwitz, E.R. & Wieman, G.A. *J. IRRIGATION and DRAINAGE ENG., ASCE*, v.119, n.5, p.909-914, Sept/Oct.1993.
17. **FERRO, V. & BAIAMONTE, G.** Flow velocity profiles in gravel bed rivers. *J.HYDR.ENG., ASCE*, v.129, n.1, p.60-80, Jan.1994.
18. **FRENCH, R.H.** *Open channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 706pp. 1988.
19. **GARCIA FLORES, M.** Resistencia al flujo em rios de montaña. *In: CONGRESO LATINOAMERICANO de HIDRAULICA, AIRH*, 17°, Guayaquil, Ecuador, 1996. *Memórias*. Guayaquil: AIRH, 1996. v.4, p.105 -113.
20. **GILLEY, J.E.; KOTTWITZ, E.R. & WIEMAN, G.A.** Darcy-Weisbach Roughness coefficients for gravel and cobble surface. *J.IRRIGATION and DRAINAGE ENG., ASCE*, v.118, n.1, p.104-112, Jan/Febr.1992.
21. **GLASS, W.L.** Discussion of hydraulics high-gradient streams bu Jarrett, R.D. *J.HYDR.ENG., ASCE*, v.113, n.7, p.918-929, Jul.1987.
22. **GRAF, W.H.** Discussion of flow resistance estimation in mountain rivers by Bathurst, J.C. *J.HYDR.ENG., ASCE*, v.113, n.6, p.612-623, Jun.1987.
23. **GRIFFITHS, G.A.** Flow resistance in course gravel bed rivers. *J.HYDR.DIV., ASCE*, v.107, Ser.HY, n.7, p.899-918, Jul.1981.
24. **HARTUNG, F. & SCHEUERLEIN, H.** Macroturbulent flow in steep open channels with high natural roughness. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL de PESQUISAS HIDRÁULICAS, IAHR*, 12°, Colorado, USA., Set.1967. *Proceedings of the Twelfth Congress of the International Association of the Hydraulic Research*. Colorado, IAHR, 1967. v.1, p.1-8.
25. **HERBICH, J.B. & SHULITS, S.** Large-scale roughness in open-channel flow. *J.HYDR.DIV., ASCE*, v.90, Ser.HY, n.6, p.203-230, Nov.1964.
26. **HEY, R.D.** Flow resistance in gravel-bed rivers. *J.HYDR.DIV., ASCE*, v.105, Ser.HY, n.4, p.365-379, Apr.1979.
27. **JAEGUI, M.N.R.** Discussion of flow resistance of large-scale roughness by Bathurst J.C., *J.HYDR.DIV., ASCE*, v.105, Ser.HY, n.11, p.1458-1459, Nov.1979.
28. **JARRETT, R.D.** Hydraulics of high-gradient streams. *J.HYDR.ENG., ASCE*, v.110, Ser.HY, n.11, p.1519-1539, Nov.1984.

29. **JUDD, H.E. & PETERSON, D.F.** Hydraulics of large bed element channels. **REP. PRWG. UTAH WATER RESEARCH LABORATORY**, n.17-6, 1969.
30. **KNIGHT, D.W. & McDONALD, J.A.** Hydraulic resistance of artificial strip roughness. **J.HYDR.DIV., ASCE**, Ser.HY, v.105, n.6, p.675-690, Jun.1979.
31. **MIRAJGAOKER, A.G. & CHARLU, K.L.N.** Natural roughness effects in rigid open channels. **J.HYDR.DIV., ASCE**, v.89, Ser.HY, n.5, p.29-44, Sept.1963.
32. **MORRIS, H.M.** Flow in rough conduits. **TRANS.ASCE**, v.120, p.373-398, 1955.
33. **NNAJI, S. & I-PAI, W.** Flow resistance from cylindrical roughness. **J.IRRIGATION and DRAINAGE DIV., ASCE**, v.99, Ser.IR, n.1, p.15-26, Mar.1973.
34. **O'LOUGHLIN, E.M. & ANNAMBHOTLA, V. S. S.** Flow phenomena near rough boundaries. **J.HYDR.RES., AIHR**, n.2, p.231-250, 1969.
35. **O'LOUGHLIN, E.M. & McDONALAD, E.G.** Some roughness concentration effects on boundary resistance. **La HOUILLE BLANCHE**, n.7, Nov.1964.
36. **PETERSON, D.F. & MOHANTY, P.K.** Flume studies of flow in steep rough channels. **J.HYDR.DIV., ASCE**, v.86, Ser.HY, n.9, p.55-76, Nov.1960.
37. **RANGA RAJU, K.G. & GARDE, R.J.** Resistance to flow over two-dimensional strip roughness. **J.HYDR.DIV., ASCE**, v.96, Ser.HY, n.3, p.815-834, Mar.1970.
38. **RICE, C.E; KADAVY, K.C. & ROBINSON, K.M.** Roughness of loose rock riprap on steep slopes. **J.HYDR.ENG., ASCE**, v.124, Ser.HY, n.2, p.179-185, Febr.1998.
39. **ROMERO SUAREZ, Y.V.** Estimacion del Coeficiente de Rugosidad de Manning con Elementos de Rugosidad Artificial para Utilizacion en Modelo Fisico, **URP, TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL** , 263pp. Ene.1994
40. **SAYRE, W.W. & ALBERTSON, M.L.** Roughness spacing in rigid open channels. **TRANS.ASCE**, v.128, Part I, Pper n.3417, p.343-427, 1963.
41. **SCHEUERLEIN, H.** The mechanics of flow in steep, rough open channels. **In: CONGRESO INTERNACIONAL de PESQUISAS HIDRÁULICAS, AIRH, 15º**, Istambul, 1973. **Proceedings of the XV Congress of the International Association of Hydraulic Research.** Istanbul: IAHR, 1973. V.1, p.457-465.
42. **SIMONS, D.B.; KHALID, A. & RUH-MING, L.** Flow resistance in cobble and boulder riverbeds. **J.HYDR.DIV., ASCE**, v.105, Ser.HY5, p.477-488, May 1979.
43. **SIMONS, D.B. & SENTURK, F.** **Sediment transport technology.** Fort Collins: Water Resources Pub., 1977.

- 44. THOMPSON, S.M. & CAMPBELL, P.L.** Hydraulics of a large channel paved with boulders. *J.HYDR.RES., IAHR*, v.17, n.4, p.341-354, 1979.
- 45. THORNE, C.R. & ZEVENBERGEN, L.W.** Estimating mean velocity in mountain rivers. *J.HYDR.ENG., ASCE*, v.111, n.4, p.612-623, Apr.1985.
- 46. UGARTE, S.A. & MENDEZ, J.R.** Resistencia al flujo em rios de montaña. *In: CONGRESO LATINOAMERICANO de HIDRAULICA, AIRH*, 16°, Santiago do Chile, 1994. *Memórias*. Santiago: AIRH, 1994. v.2, p.503-515.