

JOSÉ RODOLFO SCARATI MARTINS

**HIDRODINÂMICA DAS MACRO-RUGOSIDADES
DE FUNDO EM CANAIS**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em
Engenharia

**SÃO PAULO
2003**

JOSÉ RODOLFO SCARATI MARTINS

**HIDRODINÂMICA DAS MACRO-RUGOSIDADES
DE FUNDO EM CANAIS**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em
Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica

Orientador:
Prof. Titular
Dr. Giorgio Brighetti

**SÃO PAULO
2003**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 29 de abril de 2003.

Assinatura do Autor

Assinatura do Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Martins, José Rodolfo Scarati

Hidrodinâmica das Macro-Rugosidades de Fundo em Canais.
Edição Revisada. São Paulo, 2003.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1.Macro-rugosidade em canais 2.Perda de Carga. 3.Hidráulica.
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. II.t

Para Harumi, Beatriz e Larissa

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e incentivador, Prof. Dr. Giorgio Brighetti, pela dedicação e paciência ao longo de todos estes anos.

A minha família pelo apoio.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da EPUSP, e em especial ao Dr. Rubem Porto e Dra. Mônica Porto.

Aos amigos do Centro Tecnológico de Hidráulica, Dr. Podalyro Souza, Dr. Kikuo Tamada, Dr. Carlos Llorett, Dr. Francisco Fadiga Jr., Dr. Delduque Pinto, Dr. Winston Kanashiro, Eng^a. Raquel Santos, Eng. Flávio Conde, Eng. Leonardo Koshimura, Eng. Felipe Poon, Eng. André Nishina, Bel. Elza Cavalheiro, Vera Suyama e Nivalda Barbosa, que contribuíram em todos os detalhes.

SUMARIO

RESUMO	IV
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2 RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM CANAIS	6
2.1 INTRODUÇÃO.....	6
2.2 A RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO	7
2.2.1 <i>Fundamentos</i>	7
2.2.2 <i>Rugosidade e Camada Limite</i>	9
2.2.3 <i>Perfil Logarítmico de Velocidades</i>	10
2.2.4 <i>Lei de Velocidades a partir do Perfil Logarítmico</i>	12
2.2.5 <i>O modelo de CHIU</i>	14
2.3 O FATOR DE ATRITO <i>F</i>	21
2.3.1 <i>Fórmula de Transição de Colebrook & White</i>	22
2.3.2 <i>Influência do Número de Froude no fator de atrito</i>	23
2.3.3 <i>O fator de atrito e a equação de Manning</i>	26
2.4 MACRO-RUGOSIDADE E O PERFIL DE VELOCIDADES.....	27
2.4.1 <i>Estudos Analíticos</i>	27
2.4.2 <i>Estudos Experimentais</i>	35
2.5 ESCOAMENTO NÃO UNIFORME EM CANAIS	42
2.5.1 <i>Equações Fundamentais</i>	43
A conservação da Massa	43
O Equilíbrio de Momento	44
2.5.2 <i>O escoamento Permanente</i>	46
2.5.3 <i>A resistência ao escoamento no Movimento Não Uniforme</i>	47
3 ESTUDOS SOBRE MACRO-RUGOSIDADE EM CANAIS.....	50
3.1 INTRODUÇÃO.....	50
3.2 TRABALHO DE SAYRE E ALBERTSON.....	52
3.3 EXPERIMENTOS DE KNIGHT E MACDONALD	58
3.4 ESTUDOS ESPECÍFICOS	65
3.4.1 <i>Correlações de Shen e Li</i>	65
3.4.2 <i>Blocos Naturais</i>	67
3.4.3 <i>Modelo de Aguirre, Fuentes e Olivero</i>	70
3.4.4 <i>Estudos da Hidrovia do Araguaia</i>	73
4 ESTUDO EXPERIMENTAL DA MACRO-RUGOSIDADE DE FUNDO 76	
4.1 INTRODUÇÃO.....	76
4.2 O MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE DAS PERDAS DE ENERGIA	77

4.2.1	<i>Algoritmo de Solução</i>	78
4.2.2	<i>Modelação das Perdas de Energia</i>	79
4.2.3	<i>Correção dos Efeitos de Parede</i>	81
4.3	O MODELO FÍSICO	82
4.3.1	<i>Descrição da Bancada Experimental</i>	82
4.3.2	<i>Método de Ensaio</i>	89
4.4	RESULTADOS OBTIDOS	93
4.4.1	<i>Canal sem macro-rugosidade</i>	93
4.4.2	<i>Ensaios com a macro-rugosidade de fundo</i>	99
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	138
5.1	COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO	138
5.2	ANÁLISE PELO MODELO TIPO MANNING.....	146
5.3	ANÁLISE PELO MODELO LOGARÍTMICO	151
5.4	ANÁLISE SEGUNDO O MODELO LOGARÍTMICO HIPER-TURBULENTO	156
5.5	ANÁLISE SEGUNDO O MODELO DE CHIU.....	162
6	CONCLUSÕES RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	166
	LISTA DE REFERÊNCIAS	172
	BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA	176
	APÊNDICE A	
	APÊNDICE B	

RESUMO

O termo macro-rugosidade é empregado para caracterizar os elementos contínuos ou esparsos de formas diversas, que são aplicados artificialmente no fundo e paredes dos condutos hidráulicos, em oposição à rugosidade de grão, relacionada às asperezas das paredes destes condutos. Neste trabalho apresenta-se o estudo teórico-experimental do comportamento do escoamento livre com a presença de macro-rugosidade constituída de elementos prismáticos de seção transversal retangular, denominados *travessões*, que encontram aplicações práticas na estabilização de leitos e regularização de canais para navegação. O emprego da macro-rugosidade resulta na ocorrência de maiores perdas de energia quando as profundidades são pequenas e na redução progressiva deste efeito à medida que a lâmina d'água se eleva.

O estudo teórico compreende o tratamento dado pela literatura ao problema da resistência ao escoamento em canais, desenvolvido a partir da integração da tradicional lei logarítmica para o perfil bidimensional de velocidades. Também foi abordado o modelo de distribuição probabilística de velocidades de CHIU, baseado na maximização da entropia. Estudos específicos sobre macro-rugosidade de fundo, desenvolvidos a partir da década de 1960, foram pesquisados para orientação dos estudos experimentais desenvolvidos, notadamente os trabalhos de MORRIS & WIGGERT, SAYRE & ALBERTSON e KNIGHT & MACDONALD.

Ensaio experimentais foram desenvolvidos em canal de laboratório para a caracterização das perdas de carga dos travessões de fundo, em diferentes condições de profundidade e espaçamento longitudinal. Nestes ensaios desenvolveu-se uma técnica para medição das perdas de energia e cálculo das tensões de atrito em escoamentos permanentes e gradualmente variados no espaço, situação esta usual nos canais empregados em engenharia. Foi também considerado o efeito de parede, resultante do emprego de um canal de laboratório de pequenas dimensões, de modo a poder-se generalizar os resultados para o caso bidimensional.

Os dados experimentais permitiram o teste dos modelos para cálculo de perdas de carga de Manning e do Perfil Logarítmico, estabelecendo-se correlações entre as perdas e as características geométricas da macro-rugosidade. Como contribuição ao tema foi proposta uma adaptação do modelo logarítmico considerando a hipótese de MORRIS & WIGGERT da separação do escoamento em uma zona de interferência, denominada de zona de hiper-turbulência e outra, de turbulência normal. Os resultados obtidos indicaram a validade do modelo proposto. Ainda como contribuição ao tema, a lei de distribuição probabilística das velocidades foi aplicada, obtendo-se uma estimativa dos parâmetros para as diferentes configurações geométricas.

ABSTRACT

The designation *large-scale roughness* is generally employed to describe spot or continuous elements artificially disposed in channel bottom, different from *wall roughness* or *grain roughness*, associated to the wall material. This work presents a theoretical and experimental study of the free flow in channels with prismatic rectangular elements regularly disposed on the bottom, named *traverse blocks*, which have large application in river stabilization and navigation works. The use of the large-scale roughness results in a great head loss for small depths and a progressive reduction of these losses as the depth increases.

The theoretical analysis initially focused the traditional approach considering the logarithmic velocity distribution law. It was also analyzed the probabilistic velocity distribution law by CHIU, based on the maximum entropy principle. Specific studies about large-scale roughness, developed since 1960, were considered to guide the model tests, especially those by MORRIS & WIGGERT, SAYRE & ALBERTSON and KNIGHT & MACDONALD.

Experimental data were collected from a laboratory channel and a technique for computing bottom shear stress were developed allowing to consider permanent gradually varied flows, a regular situation in engineering applications. The wall interference in total channel shear stress was considered in order to make data comparable with those from real two-dimensional flow.

Practical correlations using geometric characteristics of the traverse block roughness and flow parameters were established considering Manning's Formula and the Logarithmic Law model. In order to achieve a better modeling of the phenomenon, a complementary term to the Logarithmic law was proposed, considering the hyper-turbulent layer over the roughness, and fit to the data. Finally, parameter estimation for the use of the CHIU's law with large-scale roughness was developed as another contribution to the matter.

LISTA DE FIGURAS

FIG. 1-1: RUGOSIDADE DE FAIXA E ESPARSA APLICADAS NO FUNDO DO CANAL.....	2
FIG. 1-2: PERSPECTIVA ARTÍSTICA DA APLICAÇÃO DE TRAVESSÕES DE FUNDO EM GABIÃO	3
FIG. 2-1: ESQUEMA DE ANÁLISE DO EQUILÍBRIO DE FORÇAS NO ESCOAMENTO	7
FIG. 2-2: TEORIA DA CAMADA LIMITE E SUBCAMADAS (SCHILICHTING, 1968)	9
FIG. 2-3: ESQUEMA CONSIDERANDO A FLUTUAÇÃO DE VELOCIDADE DA TEORIA DA TURBULÊNCIA	11
FIG. 2-4: ESQUEMA DAS TENSÕES DE REYNOLDS (PORTO, 1998).....	11
FIG. 2-5: ESQUEMA DE INTEGRAÇÃO DE KEULEGAN (APUD FRENCH, 1986).....	13
FIG. 2-6: DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DE VELOCIDADES, APUD ROUSE(1961).....	14
FIG. 2-7: RELAÇÃO U/U_{MAX} EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO M DE CHIU.....	18
FIG. 2-8: VALORES DA LEI DE VELOCIDADES DE CHIU, EM FUNÇÃO DE M.....	18
FIG. 2-9: COMPORTAMENTO DE RELAÇÕES F(M) (CHIU, 1991)	20
FIG. 2-10 COMPORTAMENTO DE U/U^* SEGUNDO CHIU(1991)	20
FIG. 2-11: FATOR DE ATRITO F, CALCULADO DE EQ. 2-43	23
FIG. 2-12 COMPORTAMENTO DO NÚMERO DE FROUDE CRÍTICO EM FUNÇÃO DE K_s , SEGUNDO IWASA (APUD ROSSO, SCHIARA E BERLAMONT, 1989).....	25
FIG. 2-13 COMPORTAMENTO DO NÚMERO DE FROUDE CRÍTICO EM FUNÇÃO DE B, SEGUNDO IWASA (APUD ROSSO, SCHIARA E BERLAMONT, 1989).....	25
FIG. 2-14 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE MANNING E K_s OBTIDOS DE EQ. 2-50	27
FIG. 2-15: DESCRIÇÃO DOS REGIMES INTERMEDIÁRIOS DE ESCOAMENTO (MORRIS, APUD CHOW, 1959).....	29
FIG. 2-16: PERFIS DE VELOCIDADE NO ESCOAMENTO TURBULENTO AFETADOS PELO EFEITO DA MACRO-RUGOSIDADE	29
FIG. 2-17: ESQUEMA DO ESCOAMENTO TURBULENTO SEMI-LISO	30
FIG. 2-18: GEOMETRIA PARA CONSIDERAÇÃO DA MACRO-RUGOSIDADE ESPARSA E NA FORMA DE FAIXAS	30
FIG. 2-19: ESQUEMA DO ESCOAMENTO HIPER-TURBULENTO	33
FIG. 2-20: ESQUEMA DO ESCOAMENTO QUASE-LISO	34
FIG. 2-21: DISTRIBUIÇÕES DE ELEMENTOS MACRO-RUGOSOS E PERFIL DE VELOCIDADE SEGUNDO O'LOUGHLIN E ANNAMBHOTLA (1968), PARA CANAIS COM RUGOSIDADE DE LARGA ESCALA DE ALTURA A E DENSIDADE λ	36
FIG. 2-22: VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO DE COLEMAN E ALONSO (1981).....	39
FIG. 2-23: ESQUEMA DO PERFIL DE VELOCIDADE ADOTADO POR KIRKGÖZ(1989)...	40
FIG. 2-24: RUGOSIDADE TÍPICA EMPREGADA NOS TESTES DE KIRKGÖZ (1989)	40
FIG. 2-25 PERFIS DE VELOCIDADE OBTIDOS POR KIRKGÖZ (1989)	41
FIG. 2-26: VALORES $\Delta U/U^*$ SEGUNDO KIRKGÖZ (1989).....	41
FIG. 2-27: VALORES EXPERIMENTAIS PARA ΔZ (APUD KIRKGÖZ ,1989)	42
FIG. 2-28: VALORES EXPERIMENTAIS DE $\Delta Z/k$	42
FIG. 2-29: CONSERVAÇÃO DE MASSA E EQUILÍBRIO DE FORÇAS NO ESCOAMENTO NÃO UNIFORME	43
FIG. 2-30: MUDANÇA DE VARIÁVEL	45

FIG. 2-31: PERFIL DAS TENSÕES TANGENCIAIS PARA ESCOAMENTOS DESACELERADOS (A) E ACELERADOS (B), ALFZALIMEHR, ANCTIL (1999)	47
FIG. 2-32: COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES TANGENCIAIS (ALFZALIMEHR, ANCTIL (1999)	48
FIG. 2-33: PERFIL DE VELOCIDADE MEDIDO E CALCULADO ATRAVÉS DA LEI LOGARÍTMICA. (ALFZALIMEHR & ANCTIL, 1999).....	49
FIG. 3-1: TRAVESSÕES (BRIGHETTI ET ALLI, 1998).....	51
FIG. 3-2: E BLOCOS DE FUNDO (SAYRE E ALBERTSON, 1961)	51
FIG. 3-3: RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE SAYRE E ALBERTSON (1961)	54
FIG. 3-4: RELAÇÃO DE ESPAÇAMENTO ψ DE SAYRE E ALBERTSON	55
FIG. 3-5: COMPORTAMENTO DO FLUXO AO REDOR DAS BARRAS.....	56
FIG. 3-6: PERFIS DE VELOCIDADES MEDIDOS POR BIERY E DELLEUR (1961)	56
FIG. 3-7: RESULTADOS DE BIERY E DELLEUR (1961)	56
FIG. 3-8 PADRÕES DE ESCOAMENTO DETALHADOS POR KNIGHT E MACDONALD (1978)	59
FIG. 3-9: FATOR DE ATRITO GLOBAL $F \times E/A$ (KNIGHT E MACDONALD).....	61
FIG. 3-10 : FATOR DE ATRITO DE FUNDO $F_B \times E/A$ (KNIGHT E MACDONALD).....	61
FIG. 3-11 : TENSÕES TANGENCIAIS $U/U_* \times H/\psi$ (KNIGHT E MACDONALD)	62
FIG. 3-12: RELAÇÃO $\psi \times L/A$ (KNIGHT E MACDONALD)	62
FIG. 3-13 DISTRIBUIÇÃO TÍPICA DAS TENSÕES TANGENCIAIS JUNTO AO FUNDO E PAREDES PARA UM CANAL RETANGULAR (KNIGHT E MACDONALD, 1978).....	63
FIG. 3-14: RELAÇÕES ENTRE τ_B E τ_w PARA DIFERENTES ARRANJOS DE RUGOSIDADE FUNDO (KNIGHT E MACDONALD, 1978).....	64
FIG. 3-15: TENSÕES TANGENCIAIS NAS PAREDES E NO FUNDO (KNIGHT E MACDONALD, 1978)	64
FIG. 3-16 EFEITO DA LARGURA DO CANAL E ALTURA DE RUGOSIDADE λ (KNIGHT E MACDONALD, 1978)	65
FIG. 3-17: PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE SHEN E LI.....	66
FIG. 3-18: DADOS EXPERIMENTAIS E CORRELAÇÃO DE SHEN E LI (1973).....	67
FIG. 3-19: COMPARAÇÃO DA EQ. 3-20 (BATHURST, 1978) E DADOS DE OUTROS PESQUISADORES	70
FIG. 3-20: ESTEIRA DE VÓRTICES SOBRE O FUNDO COM MACRO-RUGOSIDADES E PERFIL DE VELOCIDADES PROPOSTO (AGUIRRE, FUENTES E OLIVERO, 1997)	71
FIG. 3-21: DADOS EXPERIMENTAIS E EQUAÇÕES AJUSTADAS DE AGUIRRE ET ALLI PARA ELEMENTOS DE GEOMETRIA REGULAR(1997).....	72
FIG. 3-22: DADOS EXPERIMENTAIS E EQUAÇÕES AJUSTADAS DE AGUIRRE ET ALLI (1997).....	73
FIG. 3-23: EFEITO DO ESPAÇAMENTO DOS OBSTÁCULOS E COMPARAÇÃO COM AJUSTE A EQ. 3-1 (BRIGHETTI ET ALLI, 2001) (DECLIVIDADE DE FUNDO 0,1%)	74
FIG. 3-24: EFEITO DA DECLIVIDADE DE FUNDO DETECTADO POR BRIGHETTI ET ALLI (2001), PARA A RELAÇÃO A:T = 1:2	74
FIG. 3-25: EFEITO DA RELAÇÃO A:T PARA DECLIVIDADE DE FUNDO IGUAL A 0.04% (BRIGHETTI ET ALLI,2001).	75
FIG. 4-1: ESQUEMA DE DISCRETIZAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	77
FIG. 4-2: ESQUEMA DA BANCADA EXPERIMENTAL.....	91
FIG. 4-3: EXEMPLO DA PLANILHA DE CONTROLE DO ENSAIO.....	92
FIG. 4-4: FATOR DE RESISTÊNCIA DE MANNING EM FUNÇÃO DO RAIO HIDRÁULICO – CANAL EXPERIMENTAL SEM RUGOSIDADE	94

FIG. 4-5: FATOR DE ATRITO F – CANAL EXPERIMENTAL SEM MACRO-RUGOSIDADE....	94
FIG. 4-6: RELAÇÃO ENTRE AS TENSÕES TANGENCIAIS NAS PAREDES LATERAIS E NO FUNDO DO CANAL EXPERIMENTAL. COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DE OUTROS PESQUISADORES	95
FIG. 4-7: HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DOS VALORES DE CORRELAÇÃO OBTIDOS NOS ENSAIOS	131
FIG. 4-8: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 25 X 25 MM $E/A=4$ $T/A=1$	132
FIG. 4-9: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 25 X 25 MM $E/A=8$ $T/A=1$	132
FIG. 4-10: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 25 X 25 MM $E/A=9$ $T/A=1$	132
FIG. 4-11: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 25 X 25 MM $E/A=12$ $T/A=1$	133
FIG. 4-12: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 25 X 25 MM $E/A=16$ $T/A=1$	133
FIG. 4-13: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 50 X 50 MM $E/A=4$ $T/A=1$	133
FIG. 4-14: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 50 X 50 MM $E/A=8$ $T/A=1$	134
FIG. 4-15: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 50 X 50 MM $E/A=12$ $T/A=1$	134
FIG. 4-16: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 50 X 50 MM $E/A=16$ $T/A=1$	134
FIG. 4-17: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 70 X 70 MM $E/A=4$ $T/A=1$	135
FIG. 4-18: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 70 X 70 MM $E/A=6$ $T/A=1$	135
FIG. 4-19: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 70 X 70 MM $E/A=8$ $T/A=1$	135
FIG. 4-20: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 70 X 70 MM $E/A=12$ $T/A=1$	136
FIG. 4-21: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 25 X 50 MM $E/A=6$ $T/A=2$	136
FIG. 4-22: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 25 X 50 MM $E/A=9$ $T/A=2$	136
FIG. 4-23: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 25 X 50 MM $E/A=12$ $T/A=2$	137
FIG. 4-24: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 25 X 50 MM $E/A=18$ $T/A=2$	137
FIG. 4-25: ENSAIOS COM ELEMENTOS DE 50 X 50 MM $E/A=9$ $T/A=0,5$	137
FIG. 5-1: PERFIS DE VELOCIDADE CALCULADOS ATRAVÉS DO MODELO MATEMÁTICO COM RELAÇÕES DE ESPAÇAMENTO $4 \leq E/A \leq 12$, $Y/A=3$, $T/A=1$ E $Re=160.000$.	143
FIG. 5-2: VISUALIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES AO REDOR DOS OBSTÁCULOS DE FUNDO COM A TÉCNICA DE CONTRASTE DE CORES, PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE ESPAÇAMENTO COM $Y/A=3$, $T/A=1$ E $Re=80.000$...	144
FIG. 5-3: EFEITO DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO E DA RELAÇÃO E/A NA ZONA AFETADA PELO EFEITO DA MACRO-TURBULÊNCIA	145
FIG. 5-4: COMPORTAMENTO DO NÚMERO DE MANNING NOS ENSAIOS REALIZADOS .	146
FIG. 5-5: CORRELAÇÃO DOS VALORES DE N OBTIDA COM A EQ. 5-3.....	148
FIG. 5-6: RELAÇÃO N X (Y/E) PARA DIFERENTES RELAÇÕES E/A ENSAIADAS E $T/A = 1$	149
FIG. 5-7: RELAÇÃO N X (Y/E) PARA DIFERENTES RELAÇÕES E/A ENSAIADAS E $T/A = 2$	150
FIG. 5-8: RELAÇÃO DA CONSTANTE C_2 COM O ESPAÇAMENTO LONGITUDINAL	152
FIG. 5-9: DADOS EXPERIMENTAIS COMPARADOS COM A LEI LOGARÍTMICA.....	153
FIG. 5-10: PONTOS EXPERIMENTAIS E MODELO LOGARÍTMICO - OBSTÁCULOS 25 X 25 MM $E/A =9$	154
FIG. 5-11: PONTOS EXPERIMENTAIS E MODELO LOGARÍTMICO - OBSTÁCULOS 50 X 50 MM $E/A =12$	154
FIG. 5-12: PONTOS EXPERIMENTAIS E MODELO LOGARÍTMICO - OBSTÁCULOS 50 X 50 MM $E/A =16$	155
FIG. 5-13: PONTOS EXPERIMENTAIS E MODELO LOGARÍTMICO - OBSTÁCULOS 70 X 70 MM $E/A =4$	155

FIG. 5-14: PONTOS EXPERIMENTAIS E MODELO LOGARÍTMICO - OBSTÁCULOS 50x25 MM $E/A = 9$	156
FIG. 5-15: VARIAÇÃO DO PARÂMETRO ψ COM A GEOMETRIA DA MACRO-RUGOSIDADE	158
FIG. 5-16: VARIAÇÃO DO PARÂMETRO C COM O ESPAÇAMENTO RELATIVO $(E-T)/A$..	159
FIG. 5-17: PARÂMETRO A E FUNÇÃO DE $(E-T)/A$	160
FIG. 5-18: PARÂMETRO A_w E FUNÇÃO DE $(E-T)/A$	160
FIG. 5-19: RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO CALCULADA COM A EQ. 5-5 PARA $T/A=1$ E PONTOS EXPERIMENTAIS COM $E/A=8$	161
FIG. 5-20: CORRELAÇÃO $U_{MAX} \times U^*$ OBTIDA EXPERIMENTALMENTE.....	163
FIG. 5-21: CORRELAÇÃO U_{MAX} / U^* EM FUNÇÃO DE Y/E , PARA DIFERENTES RELAÇÕES E/A	165

LISTA DE TABELAS

TAB. 2-1: COEFICIENTES DE ARRASTO PARA ELEMENTOS DE MACRO-RUGOSIDADE (MORRIS, 1972).....	32
TAB. 3-1 VALORES DE C_2 DA EXPRESSÃO DE SAYRE E ALBERTSON.....	53
TAB. 3-2: VALORES DE C_D DE HARLEMAN E RUMER.....	58
TAB. 3-3 CLASSIFICAÇÃO DO ESCOAMENTO SEGUNDO KNIGHT E MACDONALD (1978).....	59
TAB. 3-4: VALORES DOS COEFICIENTES DO MODELO DE AGUIRRE, FUENTES E OLIVERO (1997).....	72
TAB. 4-1: MODELOS DE PERDA DE CARGA ADOTADOS E PARÂMETROS INTERVENIENTES.....	79
TAB. 4-2: RESULTADOS EXPERIMENTAIS – CANAL SEM A MACRO-RUGOSIDADE.....	96
TAB. 4-3: COMPOSIÇÃO DA RUGOSIDADE DE FUNDO E PAREDES NO CANAL EXPERIMENTAL.....	98
TAB. 4-4: ENSAIOS REALIZADOS COM TRAVESSÕES DE SEÇÃO RETANGULAR.....	99
TAB. 4-5: VARIAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS EM MODELO.....	99
TAB. 4-6: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 1.....	101
TAB. 4-7: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 2.....	103
TAB. 4-8: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 3.....	105
TAB. 4-9: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 4.....	107
TAB. 4-10: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 5.....	109
TAB. 4-11: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 6.....	111
TAB. 4-12: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 7.....	112
TAB. 4-13: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 8.....	113
TAB. 4-14: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 9.....	114
TAB. 4-15: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 10.....	116
TAB. 4-16: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 11.....	117
TAB. 4-17: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 12.....	119
TAB. 4-18: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 13.....	120
TAB. 4-19: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 14.....	122
TAB. 4-20: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 15.....	124

TAB. 4-21: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 16.....	126
TAB. 4-22: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 17.....	128
TAB. 4-23: DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO – SÉRIE 18.....	129
TAB. 5-1: COEFICIENTES EXPERIMENTAIS DA RELAÇÃO $N \times (Y/E)$	147
TAB. 5-2: VALORES DO COEFICIENTE C_2 DA LEI LOGARÍTMICA $U/U^*=6.06 \log(Y/A) + C_2$	152

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
α	coeficiente de distribuição de velocidade de Coriollis
α	constante de proporcionalidade genérica
β	Coeficiente de Boussinesq
ϕ	Coeficiente de Implicidade Espacial do método de diferenças empregado para solução da equação do momento
ψ	constante experimental para lei de velocidades na zona hiper-turbulenta
λ	densidade de elementos macro-rugosos
ρ	massa específica do fluido
γ	peso específico
ξ	profundidade medida em relação a um ponto de profundidade nula ξ_0
ϕ	relação funcional genérica
ν	viscosidade cinemática do fluido
μ	viscosidade dinâmica do fluido
$\Phi(..)$	Funcional
Δ, Ω	parâmetros da correlação de SHEN e Li
α, β, γ	Coeficientes de ajuste numérico para o número de Manning referente à macro-rugosidade
τ_0	tensão Tangencial junto ao fundo ou parede do canal
λ_1 e λ_2	multiplicadores de Lagrange
δ_L	espessura da camada limite laminar em x
ξ_{max}	profundidade da velocidade máxima u_{max} , medida em relação à ξ_0
τ_t	tensão tangencial
δ_T	espessura da camada limite turbulenta em x
a	dimensão característica da rugosidade (altura)
A	área da seção transversal do conduto
A	constante de integração para o perfil de velocidades na zona de turbulência normal
A_0	constante de integração de Keulegan
A_0	constante de integração genérica para o perfil de velocidade
A_L	constante de integração para a lei de turbulência lisa

SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
A_N	constante de integração para a lei de turbulência normal
A_r	área de projeção do elemento de rugosidade na direção do escoamento
A_w	constante de integração para o perfil de velocidades na zona de interferência
b	dimensão transversal do elemento de macro-rugosidade
B	dimensão transversal do conduto (largura do canal)
B	largura da seção transversal
B_i, D_i, E_i	Coefficientes da solução numérica da equação de momento
c	parâmetro de altura da camada de interferência hiper-turbulenta
C	coeficiente de <i>Chezy</i>
C	constante de integração
C_1 e C_2	Constantes de integração do modelo logarítmico de velocidades
C_D	coeficiente de arrasto
D	profundidade do canal medida em relação à superfície livre
D_h	diâmetro do conduto ou diâmetro hidráulico
e	número de Nepper
E	espaçamento longitudinal dos elementos macro-rugosos
f	fator de atrito de Darcy-Weissbach
f_L, f_{SL}	fator de atrito no escoamento turbulento liso e semi-liso
$F(M)$	Função do número adimensional de CHIU
F, F_C	número adimensional de Froude, número de Froude crítico
F^2	Número de Froude ao quadrado
F_a	força de atrito
F_r	resultante da força de arrasto sobre o elemento macro-rugoso
g	aceleração local da gravidade
h	profundidade do escoamento, desde o fundo até a superfície
H	entropia
H	profundidade do escoamento medida a partir do fundo
k	constante universal ou de <i>von Karman</i>
k_s	dimensão característica ou equivalente de rugosidade de parede
L	comprimento longitudinal do conduto ou canal em estudo
m	constante de Nikuradse

SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
M	fator de forma de SCHIARA e BERLAMONT
M	parâmetro adimensional de CHIU
n	coeficiente de rugosidade de Manning ou número de Manning
P	perímetro molhado
p_g, p_w, p_b	perímetro molhado global, das paredes e do fundo
p_i	probabilidade de ocorrência de uma informação I
r	coeficiente de correlação de Pearson
R	raio do conduto de seção circular
Re^*	número adimensional de Reynolds de atrito (relacionado com u^*)
Re, Re_x, Re_y	número adimensional de Reynolds
R_h	raio hidráulico
S	declividade ou inclinação da linha de energia
S_0	declividade ou inclinação de fundo
t	dimensão longitudinal ao escoamento do elemento de macro-rugosidade
t	dimensão longitudinal do elemento de macro-rugosidade
u	velocidade do escoamento na direção x, pontual
U	módulo da velocidade média do escoamento
U	velocidade do escoamento na direção x, média na seção transversal
u'	flutuação de velocidade na direção x
u^*	velocidade de atrito
u_{max}	velocidade máxima ao longo da vertical, na direção x
u_w	velocidade junto a parede no escoamento turbulento
v	velocidade do escoamento na direção y, pontual
v'	flutuação de velocidade na direção y
W	energia por unidade de área e unidade de tempo
y	altura do escoamento a partir do fundo do canal
y_n	profundidade normal ou do regime uniforme num canal

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A denominação genérica *macro-rugosidade*, também tratada na literatura como *rugosidade de larga escala*, é empregada para caracterizar a disposição discreta de elementos prismáticos, esféricos ou cilíndricos, nas paredes dos condutos hidráulicos, em contraposição ao termo *micro-rugosidade* ou *rugosidade de grão*, que representa a aspereza de distribuição contínua.

Os exemplos práticos deste tipo rugosidade incluem desde tubos com paredes de metal corrugado ou ondulado até blocos naturais ou artificiais, com distribuição esparsa (*spot roughness*) ou na forma de faixas (*strip roughness*) nas paredes dos canais e fundo dos rios.

O estudo da relação entre obstáculos isolados e dispostos de maneira organizada no fundo dos canais e a perda de energia introduzida no escoamento é objeto de interesse dos pesquisadores desde a década de 1950, quando foram publicados os primeiros experimentos sobre perdas de carga considerando elementos artificiais aplicados ao fundo das canalizações.

O emprego de macro-rugosidade em canais é interessante em diversas situações práticas, como por exemplo à dissipação de energia em rios e a regularização de passagens para fins de navegação. A aplicação destes elementos é vantajosa em função de seu comportamento em relação às perdas de carga no escoamento. Para escoamentos com lâminas d'água da ordem de duas a cinco vezes a altura característica do obstáculo, a turbulência gerada pela descontinuidade é mais intensa causando um grande aumento nas perdas de carga. Para lâminas d'água superiores àquele limite, o efeito é progressivamente menor.

Em outras palavras, a aplicação da rugosidade de larga escala tem efeito maior nas profundidades baixas, o que significa ser possível, na prática, obter-se lâminas

d'água mais altas em períodos de estiagem sem comprometer a capacidade máxima de descarga do canal para o período de cheias.

Com isto é possível, por exemplo, a redução das velocidades em rios de declividades altas e conseqüentemente seu poder erosivo, garantindo-se por outro lado, depois de cálculos apropriados, a capacidade de descarga para escoamento das vazões de cheia. Da mesma forma, as passagens críticas à navegação nos cursos d'água naturais podem ser regularizadas através da implantação de canais nos quais os elementos macro-rugosos são obtidos da própria escavação.

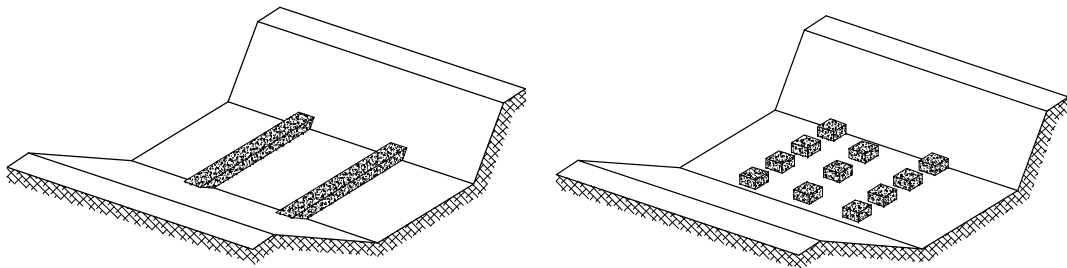


Fig. 1-1: Rugosidade de faixa e esparsa aplicadas no fundo do canal

Nos casos práticos, a forma e as dimensões destes elementos varia em função de sua origem, método de obtenção e detalhes construtivos. A bibliografia faz referência a blocos de pedra naturais, elementos prismáticos colocados de forma organizada e ainda travessões de fundo. A seção transversal destes elementos pode ser retangular, triangular, com ou sem cantos arredondados e chanfrados. Podem ser ainda empregados elementos do tipo colchões cilíndricos flexíveis preenchidos com areia, *containers* de carga preenchidos de pedra, gabiões e outras variações obtidas a partir de escavação em rocha.

A determinação das perdas de carga provocadas pela macro-rugosidade de fundo depende dos parâmetros hidráulicos da canalização e do escoamento, como também da forma geométrica e da densidade de elementos aplicada sobre o leito. A assertiva anterior engloba um conjunto muito grande de parâmetros envolvidos, dentre os quais podem ser destacados: a geometria da seção transversal, declividade de fundo,

o regime de escoamento, a relação altura-profundidade dos elementos, o espaçamento longitudinal e transversal além dos efeitos viscosos do fluido.



Fig. 1-2: Perspectiva artística da aplicação de travessões de fundo em gabião (adaptado de Maccaferri)

A resistência ao escoamento provocada pela rugosidade de larga escala é portanto um problema complexo, como são em geral os problemas em canais abertos. Em recente artigo, YEN (2002) chama a atenção de que o enfoque do problema da resistência ao escoamento em canais deve considerar os aspectos da resistência pontual, da seção e do trecho, bem como a composição dos efeitos de diferentes interfaces escoamento-seção e alerta para a necessidade de se continuarem às pesquisas tanto no campo teórico como no experimental.

A abordagem clássica da *resistência ao escoamento* é feita a partir do modelo matemático de *von Karman – Prandtl*, para a distribuição bidimensional de velocidades no escoamento. Esta distribuição considera uma lei logarítmica para o perfil vertical, deduzida a partir de considerações sobre a tensão tangencial entre o fluido e a parede (fundo) do canal .

Embora imperfeita sob o aspecto teórico, uma vez que não explica algumas constatações práticas como a ocorrência de velocidade máxima abaixo ou acima da superfície livre e o fato de não se obter velocidade nula junto ao fundo, a lei de *von Karman – Prandtl* mostra-se aplicável em muitos casos, como nos condutos forçados e mesmo condutos livres com rugosidades de larga escala.

Nestes casos, a lei logarítmica é ajustada em função de parâmetros geométricos dos elementos constituintes da macro-rugosidade, como a relação entre a profundidade, altura e espaçamento longitudinal.

Outras formas para a lei de distribuição de velocidades vem sendo experimentadas ao longo do tempo, com o intuito de se respeitar condições de contorno mais genéricas. Dentre estas as mais populares são a forma parabólica e a sinusoidal, ambas com fundamentos praticamente empíricos.

CHIU, em série de trabalhos publicados a partir de 1987, propôs nova forma para a lei de distribuição de velocidades, baseada no conceito de entropia máxima e tomando como parâmetro a uniformidade da distribuição de probabilidade das velocidades ao longo de uma vertical. Esta lei, que não tem as restrições de contorno da forma logarítmica, mostra-se bastante promissora pois permite a determinação analítica das tensões tangenciais junto ao fundo.

Neste contexto, é objetivo deste trabalho apresentar uma pesquisa teórico-experimental sobre as perdas de carga geradas por elementos prismáticos de seção retangular dispostos no fundo de canais, denominados *travessões*, com o objetivo de caracterizar seu comportamento e definir os modelos matemáticos e parâmetros necessários para sua aplicação prática.

A estrutura do trabalho apresenta uma revisão bibliográfica dos estudos sobre perdas de carga e macro-rugosidade em canais, enfocando principalmente os trabalhos desenvolvidos nas décadas de 1960 e 1970, referentes ao emprego de blocos isolados e distribuídos esparsamente sobre o fundo dos canais.

Em paralelo desenvolveu-se um trabalho experimental com apoio de modelação física e matemática, para levantamento de dados destinados a caracterizar o efeito dos travessões de fundo de formato retangular sobre o escoamento num canal. Para tal foi desenvolvida uma metodologia de determinação da resistência ao escoamento com base na medição de linha d'água em regime permanente gradualmente variado.

Esta metodologia fundamenta-se na aplicação das equações de quantidade de movimento e na técnica de otimização não linear.

Os dados obtidos foram então empregados no ajuste de modelos matemáticos já consagrados como a fórmula de Manning e a Lei logarítmica de distribuição de velocidades. Como contribuição ao tema apresenta-se a proposta de introdução de mais um termo na equação do modelo logarítmico, para considerar a transição entre o escoamento hiper-turbulento e o escoamento turbulento rugoso. Também é apresentada a estimativa de parâmetros relativos à macro-rugosidade para emprego com o modelo de distribuição de velocidades de CHIU(1988).

2 RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM CANAIS

2.1 Introdução

A engenharia hidráulica enfoca o problema de dimensionamento hidráulico de condutos, como sendo o de determinar ou prever as perdas de carga para uma gama determinada de condições intervenientes, sendo as principais a velocidade do escoamento, as condições geométricas do conduto e as características intrínsecas do fluido.

Apesar de originalmente ter-se fundamentado em observações empíricas, o conceito de resistência ao escoamento fluido está comprovadamente ligado à ação das forças viscosas sobre a massa líquida, originada tanto pela interação interna entre as partículas de fluido como pelo efeito da fronteira ou contorno físico.

O estudo sistemático da resistência ao escoamento tradicionalmente é dividido em duas categorias: aqueles nos quais o fluido é totalmente contido pelo conduto, dito conduto fechado, e aqueles nos quais existe uma superfície livre, os condutos abertos. Considerando (MORRIS & WIGGERT, 1972) ser esta a única diferença, os dois processos são similares em muitos pontos e as mesmas equações podem ser utilizadas para ambos.

O tratamento analítico clássico considera os efeitos do desenvolvimento da camada limite viscosa junto às paredes do conduto, introduz o conceito de turbulência para a modelação da distribuição bidimensional de velocidades num escoamento genérico e, a partir destes resultados, estabelece leis para a modelação do perfil de velocidades e quantificação das forças de resistência.

Alguns fundamentos da abordagem clássica são considerados a seguir, acrescidos da análise dos efeitos da macro-rugosidade nas leis de resistência e os efeitos no escoamento não uniforme.

2.2 A Resistência ao Escoamento

2.2.1 Fundamentos

Os fundamentos das leis que modelam a resistência ao escoamento em canalizações genéricas foram postulados por Chezy, Darcy e Reynolds (apud ACKERS, 1958) em fins do século XIX. De fato, deve-se a Chezy, através de seus experimentos com canais de terra com superfície da lâmina d'água paralela ao fundo, a equação do movimento fluido derivada da relação entre a força peso decomposta na direção paralela ao fundo do canal e a resistência ao escoamento em função do atrito em sentido contrário.

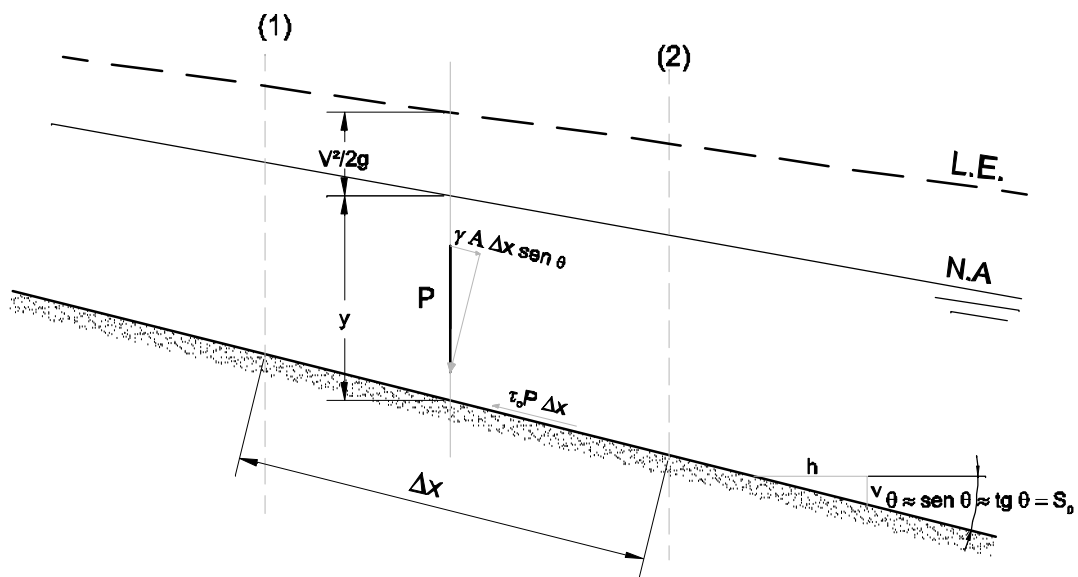


Fig. 2-1: Esquema de análise do equilíbrio de forças no escoamento

Eq. 2-1
$$\tau_0 = \gamma \frac{A}{P} S_0 = \alpha \rho U^2$$

Nesta expressão a relação A/P foi denominada *Raio Hidráulico* e a constante de proporcionalidade α juntamente com a aceleração da gravidade foram incorporadas num coeficiente único C , dito Coeficiente de Chezy.

$$\text{Eq. 2-2} \quad U = \sqrt{\frac{g}{\alpha}} \sqrt{R_h S_0} = C \sqrt{R_h S_0}$$

O parâmetro C , referenciado na bibliografia como a *constante de Chezy* supostamente levaria em consideração todos os parâmetros intervenientes na resistência ao escoamento.

A grandeza τ_0 mencionada anteriormente se refere à tensão tangencial junto ao fundo, considerada constante e independente. A relação τ_0/ρ , cujo significado é tensão tangencial junto ao fundo por unidade de massa específica, tem dimensões de velocidade ($[L]/[T]$), sendo chamada de *velocidade de atrito*.

$$\text{Eq. 2-3} \quad \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = u_* = \sqrt{g R_h S_0}$$

Darcy e Weissbach (apud ROUSE, 1961) sugeriram uma expressão similar para escoamento em tubos, considerando a declividade da linha de energia e introduzindo um parâmetro f relacionado com as tensões tangenciais em sentido contrário ao escoamento, denominado *fator de atrito*.

$$\text{Eq. 2-4} \quad S = f \frac{1}{D} \frac{U^2}{2g}$$

A partir dos experimentos de Nikuradse, empregando tubos com rugosidade artificial, deduziu-se que o fator de atrito f e a tensão tangencial τ_0 estão ligados ao grupo adimensional Re , número de Reynolds além das características geométricas k_s da rugosidade de parede.

$$\text{Eq. 2-5} \quad f = \frac{2gDS}{U^2} = \Phi(Re, D, k_s)$$

Por analogia se pode escrever a relação entre C e f considerando a relação $R_h = 4D$

$$\text{Eq. 2-6} \quad C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

2.2.2 Rugosidade e Camada Limite

SCHILICHTING (1968), a partir de estudos sobre o desenvolvimento da camada limite (região de interface fluido-parede) efetuados por diversos pesquisadores, apresenta uma interpretação dos efeitos da rugosidade das paredes sobre o escoamento subdividindo em três regiões o escoamento no contato: camada laminar, camada turbulenta e subcamada virtual ou viscosa.

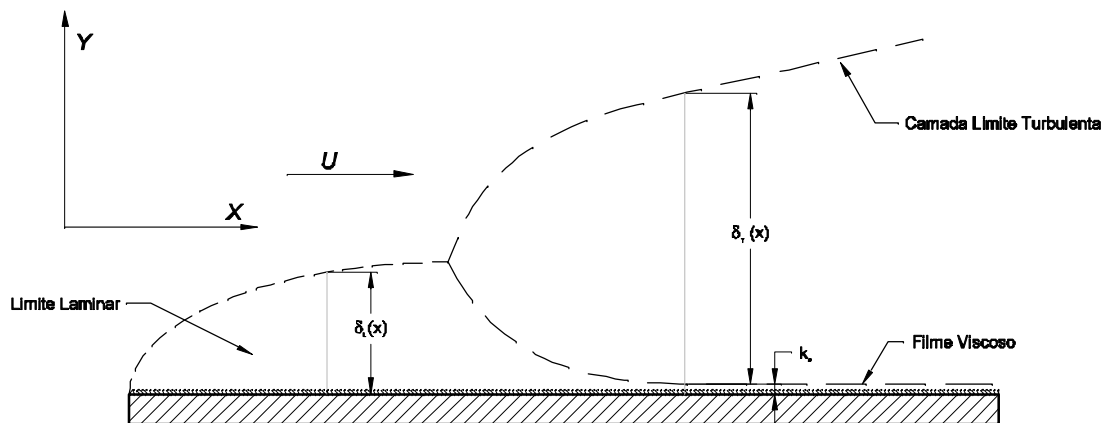


Fig. 2-2: Teoria da Camada Limite e Subcamadas (SCHILICHTING, 1968)

As espessuras das camadas podem ser estimadas aproximadamente pelas relações abaixo, nas quais Re_x é o número de Reynolds calculado em função da grandeza x , distância medida a partir do bordo de ataque. A transição entre as duas camadas ocorre para a faixa de $5 \times 10^5 \leq Re_x \leq 1 \times 10^6$.

$$\text{Eq. 2-7} \quad \delta_L = \frac{5x}{Re_x} \text{ e } \delta_T = \frac{0.37x}{Re_x^{0.2}}$$

$$\text{Eq. 2-8} \quad \text{Re}_x = \frac{u \cdot x}{\nu}$$

Com base na Teoria da Camada Limite pode-se explicar o escoamento junto às paredes (CHOW,1959) como sendo função da relação entre a espessura da subcamada limite viscosa e a altura característica das asperezas das paredes k_s , que funciona como elemento de separação:

- Liso: onde o efeito das asperezas da parede é desprezível face às tensões tangenciais geradas pelas forças viscosas ($\frac{k_s u_*}{\nu} \leq 5$)
- Transição: onde a subcamada viscosa tem efeito atenuante sobre a rugosidade de parede ($5 \leq \frac{k_s u_*}{\nu} \leq 70$)
- Rugoso: onde a subcamada viscosa tem dimensões inferiores à da rugosidade das paredes ($70 \leq \frac{k_s u_*}{\nu}$)

Na região de transição, o filme viscoso encobre parcialmente as asperezas da parede, reduzindo sua influência sobre a resistência ao escoamento, enquanto no escoamento turbulento o efeito da rugosidade é plenamente sentido. Schlichting (apud CHOW,1959) indica a existência de uma condição crítica de rugosidade a partir da qual o escoamento deixa de ser liso:

$$\text{Eq. 2-9} \quad k_s = \frac{5C\nu}{U\sqrt{g}}$$

2.2.3 Perfil Logarítmico de Velocidades

Uma das hipóteses para interpretação da turbulência está na associação de parcelas flutuantes e aleatórias às componentes da velocidade total da partícula u e v . Estas componentes, conforme ilustra a Fig. 2-3 são expressas da forma:

Eq. 2-10
$$\begin{aligned} \vec{u} &= \bar{u} + u' \\ \vec{v} &= \bar{v} + v' \end{aligned}$$

Um elemento de volume infinitesimal sujeito a estas flutuações receberá a ação de uma força que, por unidade de área, representa as *Tensões de Reynolds* no escoamento turbulento.

Eq. 2-11
$$\frac{F_a}{dA} = \rho u'v' = \tau_t$$

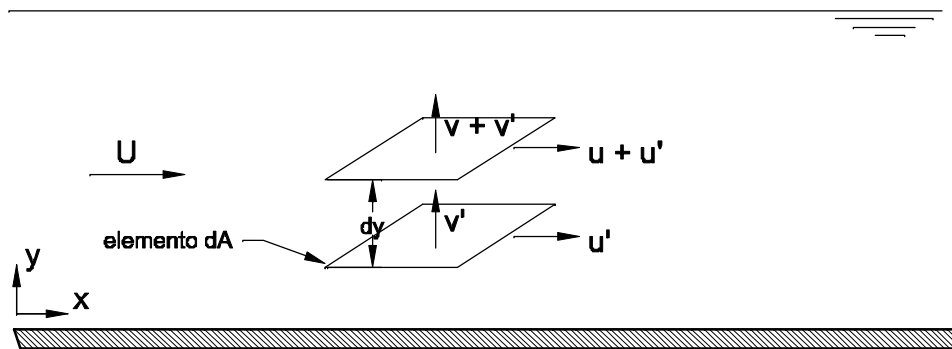


Fig. 2-3: Esquema considerando a flutuação de velocidade da teoria da turbulência

PRANDTL (1925), admitindo a hipótese de turbulência isotrópica ($u'=v'$), considerou estas flutuações de velocidade proporcionais à (du/dy) , sendo a constante de proporcionalidade igual a um deslocamento l do elemento, resultando:

Eq. 2-12
$$\tau_t = \rho l^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$$

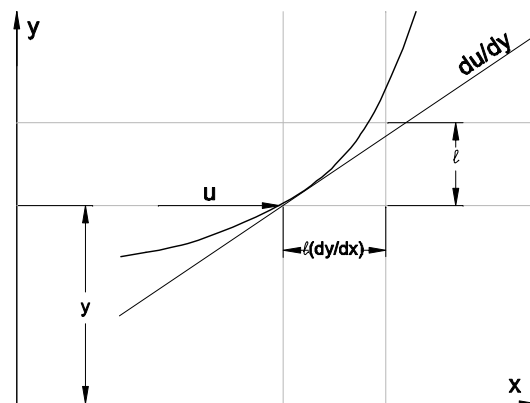


Fig. 2-4: Esquema das Tensões de Reynolds (PORTO, 1998)

Admitindo ainda que junto à parede $l = k \cdot y$ e τ_t constante e igual a τ_0 obtém-se a forma diferencial da lei de velocidades, onde o termo k , denominado *Constante de von Karman* é usualmente adotado entre 0,38 e 0,40.

$$\text{Eq. 2-13} \quad \frac{du}{dy} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \frac{1}{y}$$

A integração da Eq. 2-13 resulta na clássica fórmula do *perfil logarítmico de velocidades* ou *Equação de von Karman-Prandtl*, de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho.

$$\text{Eq. 2-14} \quad u = 2,5 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \ln\left(\frac{y}{C}\right) \quad \text{ou} \quad u = 5,75 \cdot u_* \log\left(\frac{y}{C}\right)$$

O parâmetro C da Eq. 2-14 pode ser determinado experimentalmente para as diferentes condições de escoamento. Nikuradse em experiências com rugosidade artificial propôs relações levando em conta a velocidade de atrito nos escoamentos lisos e a altura da rugosidade k_s para o caso dos escoamentos rugosos:

- $C = m \frac{D}{u_*} = \frac{1}{9} \frac{D}{u_*}$ para escoamento liso
- $C = m \frac{D}{u_*} = \frac{1}{30} k_s$ para escoamento rugoso.

2.2.4 Lei de Velocidades a partir do Perfil Logarítmico

Keulegan apresentou diversas contribuições ao estudo da resistência ao escoamento em canais, porém a principal consiste na integração da equação do perfil de velocidades logarítmico, conforme apresentado na Eq. 2-14. A integração, conforme apresentada em CHOW (1959), é feita considerando elementos de mesma velocidade na seção transversal, conforme ilustra o esquema da Fig. 2-5.

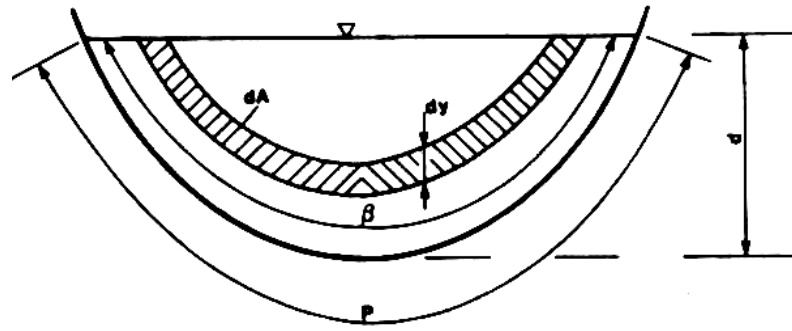


Fig. 2-5: Esquema de Integração de Keulegan (apud FRENCH, 1986)

O resultado obtido tem a forma de uma lei genérica conforme mostrado na relação da Eq. 2-15, onde a constante de integração A_0 reúne diversos parâmetros de forma da seção transversal, bem como características da rugosidade de parede.

$$\text{Eq. 2-15} \quad \frac{U}{u_*} = 2.5 \ln\left(\frac{mR_h}{\nu}\right) + A_0$$

Utilizando os dados de Nikuradse para canais *lisos*, Keulegan obteve a seguinte relação teórica

$$\text{Eq. 2-16} \quad \frac{U}{u_*} = 2.5 \ln\left(\frac{R_h \cdot u_*}{\nu}\right) + 3.25$$

A mesma análise feita com os dados de Bazin para canais *rugosos*, segundo indica CHOW (1959), apresentou grande variação para o termo A_0 , tendo sido adotado um valor médio igual a 6,25.

$$\text{Eq. 2-17} \quad \frac{U}{u_*} = 2.5 \ln\left(\frac{R_h}{k_s}\right) + 6.25$$

A partir da lei universal expressa na Eq. 2-14, considerando como condições de contorno para determinação da constante de integração C a velocidade nula junto a parede ($y=0$) e máxima na superfície ($y=h$), podem ser deduzidas leis para a distribuição bidimensional da velocidade consideradas pela bibliografia como

“Universais” (PORTO, 1998). As hipóteses consideradas não são exatamente verdadeiras para o caso de canais estreitos, porém tendem a sê-lo no caso de canais largos conforme ilustram os exemplos de ROUSE (1961).

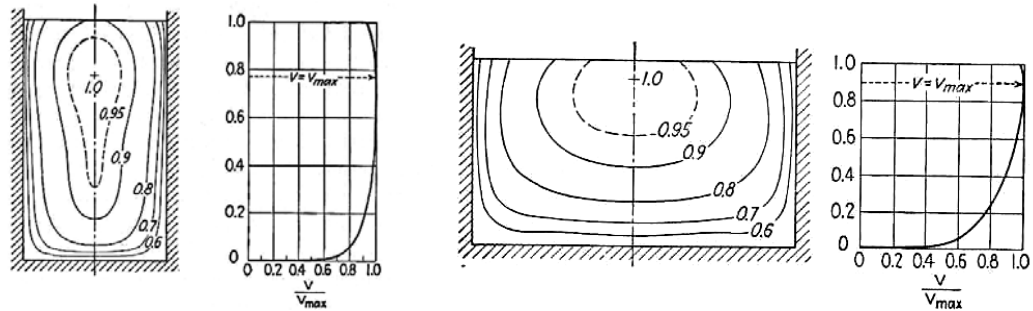


Fig. 2-6: Distribuição Transversal de Velocidades, apud ROUSE(1961)

A equação resultante representa o comportamento da velocidade na direção do escoamento em função da velocidade máxima na seção, na forma:

$$\text{Eq. 2-18} \quad \frac{u_{\max} - u}{u_*} = 2.5 \cdot \ln\left(\frac{v}{h \cdot u_*}\right) + 2.5 \cdot \ln\left(\frac{y \cdot u_*}{v}\right)$$

2.2.5 O modelo de CHIU

CHIU, (1988, 1991, 1995, 2001) em série de trabalhos publicados a partir de 1987, propõe a determinação do perfil de velocidades a partir do conceito de entropia da distribuição de probabilidades, referenciado como *maximização da entropia*. Originada na teoria da informação, a entropia é uma medida da qualidade de uma determinada informação inserida numa seqüência de informações, cada qual com uma probabilidade de ocorrência p_i . De acordo com esta definição a entropia H é definida como:

$$\text{Eq. 2-19} \quad H = -\sum p_i \cdot \log p_i$$

Para o desenvolvimento de uma lei de distribuição de velocidade, foi considerada uma lei de distribuição de probabilidades do tipo da Eq. 2-20, na qual $p(u) > 0$ para $0 \leq u \leq u_{\max}$.

$$\text{Eq. 2-20} \quad p(u) = e^{\lambda_1 + \lambda_2 u}$$

O método passou por muitos aperfeiçoamentos incluindo a adoção de um sistema de coordenadas curvilíneas sobre as linhas de mesma velocidade na seção (FRENCH, 1987). Posto desta forma, a distribuição resultante apresenta nítidas vantagens sobre a de *von Karman-Prandtl*, pois genericamente admite que a velocidade máxima não se situa na superfície livre e satisfaz a condição de velocidade nula no contorno.

O autor propõe um parâmetro adimensional M , que pode ser relacionado experimentalmente com os demais parâmetros característicos como velocidade média, tensão de atrito e concentração de sedimentos.

A dedução da Lei de CHIU, conforme apresentada por MINEI (1999), pode ser resumida considerando que u (velocidade) e ξ (profundidade a partir de um ponto de velocidade nula) são variáveis aleatórias, sujeitas a uma distribuição de probabilidade $p(u)$ para $(0 \leq u \leq u_{\max})$ e $(\xi_0 \leq \xi \leq \xi_{\max})$. Neste caso a probabilidade da velocidade ser menor ou igual a u , ou seja a densidade de probabilidade de u é:

$$\text{Eq. 2-21} \quad P(u) = \int_0^u p(u) du = \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0}$$

Portanto, de acordo com a definição, a melhor informação sobre u será obtida maximizando-se a entropia da série probabilística de u , ou seja, determinando-se a entropia máxima:

$$\text{Eq. 2-22} \quad H(u) = \int_0^{u_{\max}} -p(u) \ln[p(u)] du$$

Para esta integração, utilizam-se multiplicadores de Lagrange λ_1 e λ_2 de forma que:

$$\text{Eq. 2-23} \quad \frac{\partial}{\partial p} [-p \cdot \ln p + \lambda_1 p + \lambda_2 (up)] = 0$$

As condições de integração impostas são: a probabilidade acumulada $P(u)$ é unitária e a integral do produto entre a velocidade pontual u e sua probabilidade, sobre a área da seção deve respeitar a conservação de massa. A aplicação destes conceitos leva a distribuição de velocidades conhecida como Lei de CHIU:

$$\text{Eq. 2-24} \quad \int_0^{u_{\max}} p(u) du = 1$$

$$\int_0^{u_{\max}} u \cdot p(u) \cdot du = U$$

Substituindo a Eq. 2-23 nas Eq. 2-24 resulta

$$\text{Eq. 2-25} \quad e^{\lambda_1 - 1} = \frac{\lambda_2}{e^{\lambda_2 u_{\max}} - 1}$$

$$\text{Eq. 2-26} \quad U = u_{\max} \left(\frac{e^{\lambda_2 u_{\max}}}{e^{\lambda_2 u_{\max}} - 1} - \frac{1}{e^{\lambda_2 u_{\max}}} \right)$$

Considerando que $u = 0$ para $\xi = \xi_0$ finalmente resulta:

$$\text{Eq. 2-27} \quad u = \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \left[1 + \frac{\lambda_2}{e^{\lambda_1 - 1}} \frac{\xi - \xi_0}{\zeta_{\max} - \xi_0} \right]$$

Se U e u_{\max} são conhecidos, através de medições, pode-se determinar o valor de λ_1 , ficando λ_2 como função de u_{\max} . Assim, introduzindo-se o parâmetro $M = \lambda_2 \cdot u_{\max}$, resultam as expressões finais:

$$\text{Eq. 2-28} \quad \frac{u}{u_{\max}} = \frac{1}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right]$$

$$\text{Eq. 2-29} \quad \frac{U}{u_{\max}} = \left(\frac{e^M}{e^M - 1} \right) - \frac{1}{M}$$

A variável ξ é definida por um sistema de coordenadas curvilíneas onde todos os pontos tem a mesma velocidade $u(\xi)$. Para as aplicações usuais pode-se considerar que a velocidade máxima se encontra a superfície e que junto ao fundo a mesma será nula, de forma que:

$$\text{Eq. 2-30} \quad \xi = \frac{y}{D+h} e^{\left(1 - \frac{y}{D+h}\right)}$$

Na última expressão, D é a profundidade medida a partir da superfície livre e h a distância na qual ocorre a profundidade máxima abaixo da superfície. Em particular, considerando-se que para um canal a velocidade u_{\max} ocorre na superfície livre, tem-se que $\xi=y/D$, e a forma genérica:

$$\text{Eq. 2-31} \quad \frac{u}{u_{\max}} = \frac{1}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{y}{D} e^{\left(1 - \frac{y}{D}\right)} \right]$$

O parâmetro adimensional M , derivado da integração é um formador da distribuição de probabilidade de velocidades da seção e mede diretamente sua uniformidade. Quanto maior o valor de M , mais próxima da uniforme será esta distribuição de velocidades.

A Fig. 2-7 ilustra o comportamento da velocidade média U em função do parâmetro M , calculado a partir da Eq. 2-28 e da Eq. 2-29. Na Fig. 2-8 pode-se verificar o comportamento do perfil de velocidades segundo a lei de CHIU, determinado em relação à velocidade média na vertical pela relação (Eq. 2-29 e Eq. 2-30).

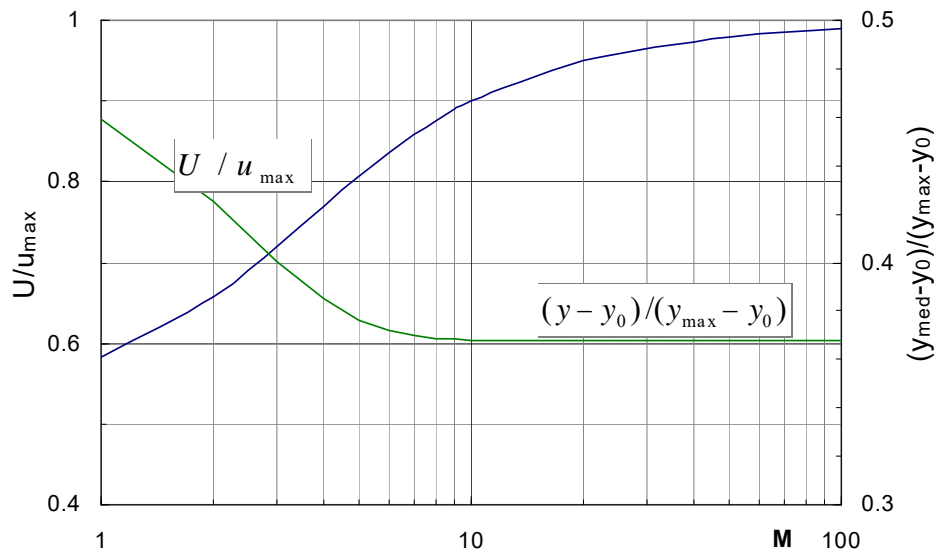


Fig. 2-7: Relação U/u_{max} em função do parâmetro M de CHIU

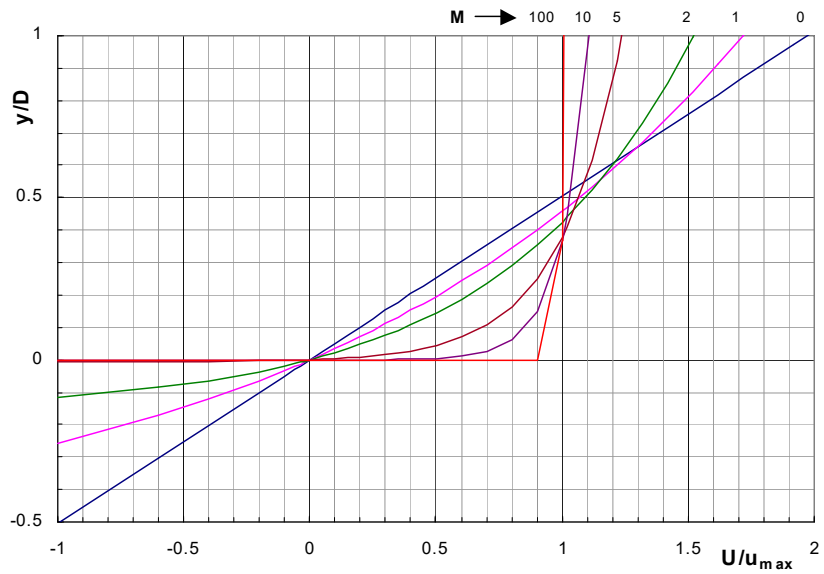


Fig. 2-8: Valores da Lei de Velocidades de CHIU, em função de M

Pesquisas posteriores, citadas por MINEI(1999), apresentam a relação $u_{\max}=1,46 \cdot U$ para rios de grande largura em trechos retilíneos e $u_{\max}=1,24 \cdot U$ para trechos em curva. No mencionado trabalho, MINEI realizou pesquisa com dados de campo e concluiu que o número M , que segundo CHIU é relacionado às características hidrogeométricas da seção está também relacionado à turbulência do escoamento.

CHIU (1991) apresenta também importantes relações entre M e outros parâmetros do escoamento, como a tensão tangencial junto ao fundo τ_0 .

$$\text{Eq. 2-32} \quad u_{\max} e^{\lambda_1} = \frac{M}{e^M - 1}$$

$$\text{Eq. 2-33} \quad U e^{\lambda_1} = \frac{M e^M - e^M + 1}{(e^M - 1)^2}$$

$$\text{Eq. 2-34} \quad \tau_0 = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_0 = \frac{\mu}{D e^{\lambda_1}}$$

$$\text{Eq. 2-35} \quad \lambda_1 = \ln \left[\frac{\nu}{u_*^2 D} \right]$$

Manipulando-se Eq. 2-33 e Eq. 2-34 pode-se definir uma relação entre a velocidade média e a velocidade de atrito junto ao fundo. O comportamento teórico desta relação é apresentado na Fig. 2-10.

$$\text{Eq. 2-36} \quad \frac{U}{u_*} = \text{Re}_* F(M)$$

$$\text{onde } \text{Re}_* = \frac{u_* D}{\nu} \text{ e } F(M) = \frac{M e^M - e^M + 1}{(e^M - 1)^2}$$

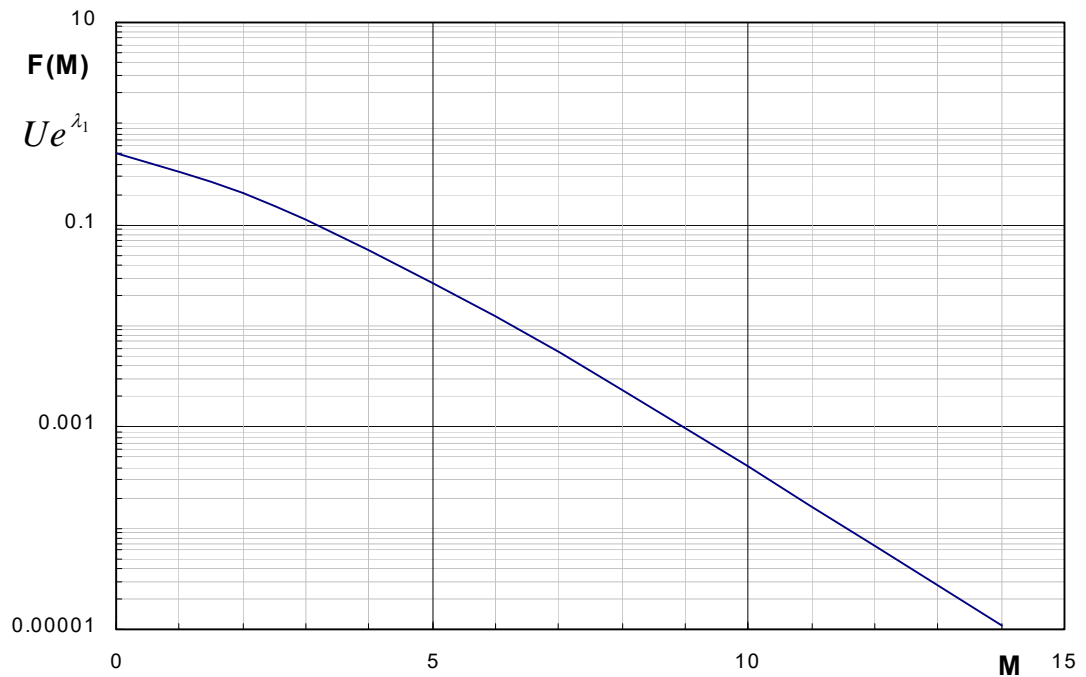


Fig. 2-9: Comportamento de relações F(M) (CHIU, 1991)

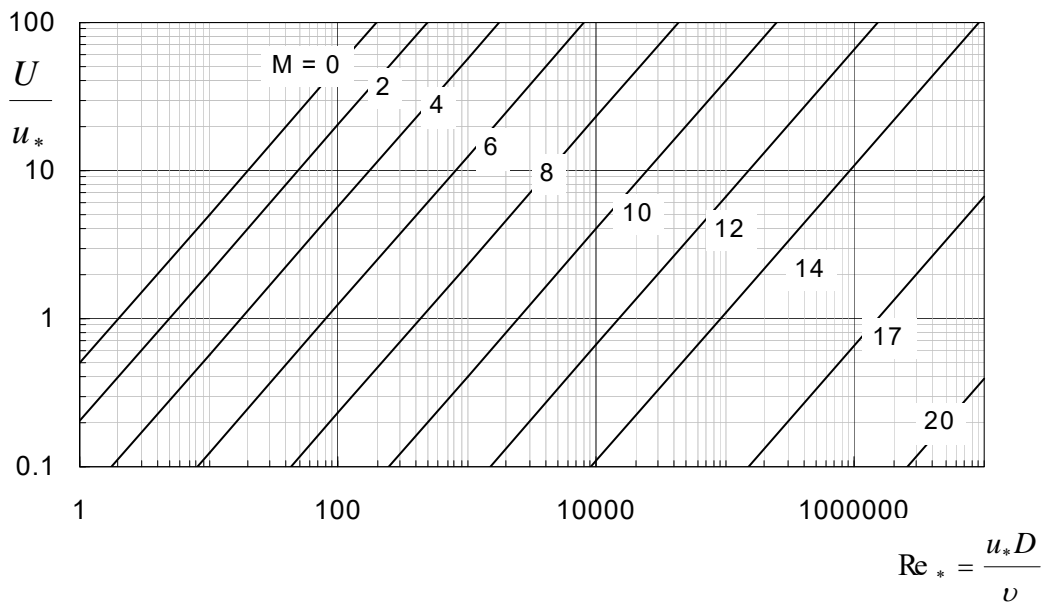


Fig. 2-10 Comportamento de U/u_* segundo CHIU(1991)

Experimentos desenvolvidos em canais com relações profundidade/largura (D/B) da ordem de 1 a 100 e declividades de fundo entre 2×10^{-5} a 2×10^{-2} , permitiram

estabelecer a relação entre a velocidade máxima na vertical e a velocidade de atrito u_* , da forma:

$$\text{Eq. 2-37} \quad \frac{u_{\max}}{u_*} = 1.283 \left(\frac{U}{u_*} \right)^{0.956}$$

2.3 O Fator de Atrito f

O comportamento do fator de atrito f , introduzido na Eq. 2-4, pode ser analisado a partir das equações que definem o perfil de velocidade nos condutos. Para valores do adimensional Re inferiores a 2000, a rugosidade não tem efeito sobre a resistência ao escoamento. A perfeita relação obtida por Nikuradse para a região de escoamento laminar permite definir neste estágio a forma:

$$\text{Eq. 2-38} \quad f = \frac{64}{Re}$$

Para escoamentos hidraulicamente lisos, Blasius propôs uma relação válida para a região $Re \leq 100.000$, na forma:

$$\text{Eq. 2-39} \quad f = \frac{0.32}{Re^{0.25}}$$

Para os escoamentos turbulentos a combinação da Eq. 2-2 com a Eq. 2-3 e a Eq. 2-16 resulta para escoamentos hidraulicamente lisos:

$$\frac{U}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 2.5 \cdot \ln\left(\frac{R_h u_*}{\nu}\right) + 3.25$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0.884 \cdot \ln\left(\frac{Re \sqrt{f}}{11.31}\right) + 1.149$$

e finalmente:

$$\text{Eq. 2-40} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = 2.04 \cdot \log\left(\frac{\text{Re}\sqrt{f}}{3.08}\right)$$

Da mesma forma, para escoamento rugosos

$$\text{Eq. 2-41} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = 2.04 \cdot \log\left(\frac{12.2 \cdot R_h}{k_s}\right)$$

2.3.1 Fórmula de Transição de Colebrook & White

Colebrook e White apresentaram em 1939 (apud ACKERS, 1958) os resultados de estudos em tubulações com rugosidade imposta artificialmente juntamente com a análise de diversos resultados de outros autores. Os autores propuseram uma equação única para a transição entre o escoamento liso e rugoso nas tubulações comerciais com rugosidade equivalente a k_s . A equação adaptada para canais tem a forma:

$$\text{Eq. 2-42} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log\left(\frac{\text{Re}\sqrt{f}}{2.51} + \frac{14.8 \cdot R_h}{k_s}\right)$$

É prática e interessante a expressão combinada proposta por SWAMEE (1976, apud PORTO) para o cálculo explícito do fator f :

$$\text{Eq. 2-43} \quad f = \left\{ \left(\frac{64}{\text{RE}} \right)^8 + 9.5 \left[\ln \left(\frac{k}{14.8 R_h} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) - \left(\frac{2500}{\text{Re}} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0.125}$$

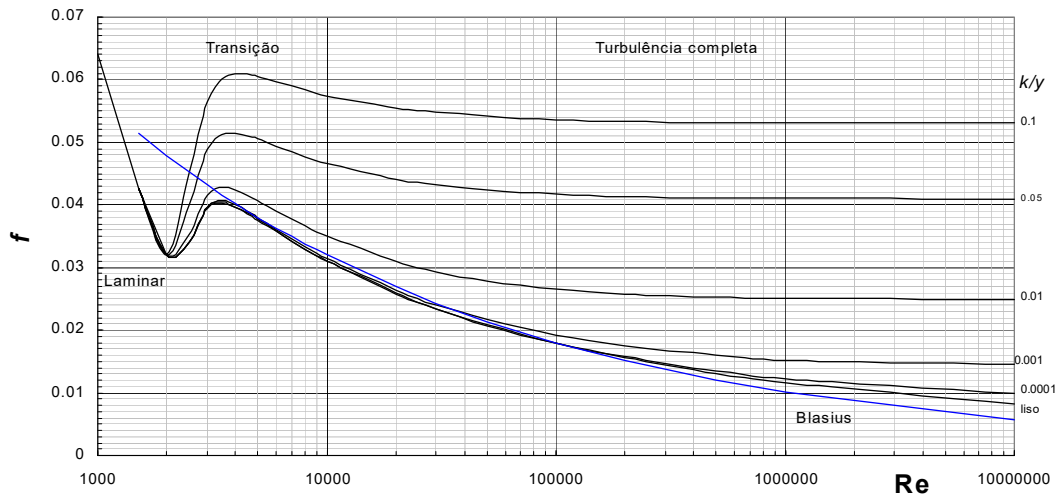


Fig. 2-11: Fator de Atrito f , calculado de Eq. 2-43

2.3.2 Influência do Número de Froude no fator de atrito

Nos condutos livres, o escoamento turbulento apresenta instabilidades à medida em que o número de Froude F aproxima-se de um certo valor crítico F_c , ocorrendo formação de ondas superficiais denominadas *roll waves*. Esta condição provoca um aumento no fator de atrito f , aumento este que é função da relação (F/F_c) .

BERLAMONT e VANDERSPATEN (apud ROSSO, SCHIARA e BERLAMONT, 1989) propõem uma relação para a determinação do número de Froude crítico para canais rugosos, em função do número de Reynolds Re , do coeficiente de distribuição de velocidades α , da rugosidade do canal k_s e da largura da seção transversal B .

Eq. 2-44

$$F_c = \left\{ \alpha - 2\alpha \left[1 + \frac{M}{2}(3\phi + 1) \right] + \left[1 + \frac{M}{2}(3\phi + 1) \right]^2 \right\}^{-1/2}$$

O coeficiente de velocidade α , para canais muito largos pode ser considerado igual a 1. De acordo com IWASA (apud ROSSO, SCHIARA e BERLAMONT, 1989), α pode ser escrito em função de f_0 , que é o fator de atrito para condições de escoamento estável.

$$\text{Eq. 2-45} \quad \alpha = 1 + 0.781f_0$$

O parâmetro M é um fator de forma da seção que admite o valor 1 para canais muito largos e a expressão abaixo para canais retangulares:

$$\text{Eq. 2-46} \quad M = [1 + 2(H/B)]^{-1}$$

O parâmetro ϕ leva em conta a rugosidade equivalente k_s de NIKURADSE, o número de Reynolds Re , o raio hidráulico da seção R_h e f_0 , tendendo a zero para escoamentos rugosos.

$$\text{Eq. 2-47} \quad \phi = \frac{2.671}{\left((k_s / R_h) / 12.20 + 3.04 / R \sqrt{f_0} \right) Re}$$

As figuras abaixo ilustram o comportamento de F_C como função da largura do canal B e da rugosidade equivalente k_s .

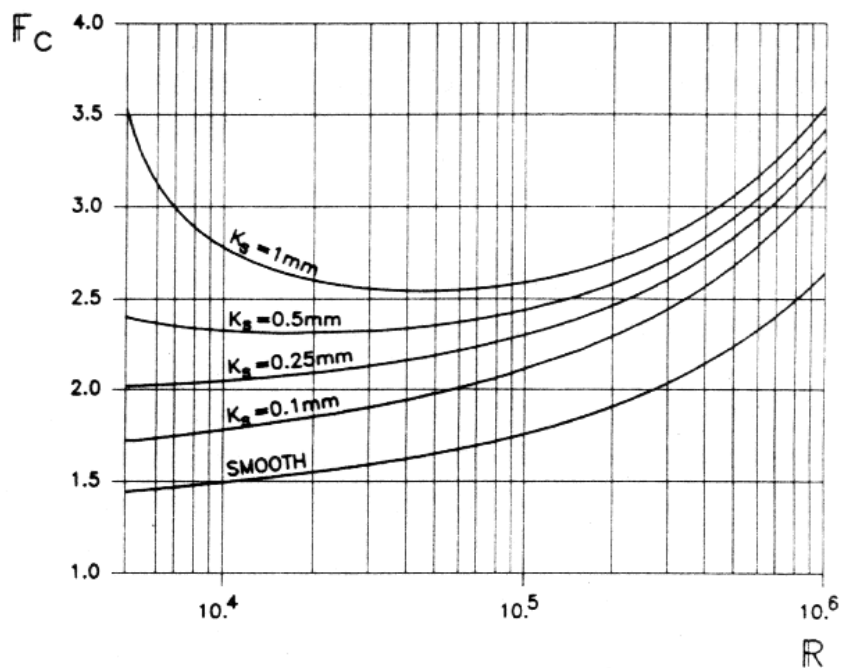


Fig. 2-12 Comportamento do Número de Froude Crítico em função de K_s , segundo Iwasa (apud ROSSO, SCHIARA e BERLAMONT, 1989)

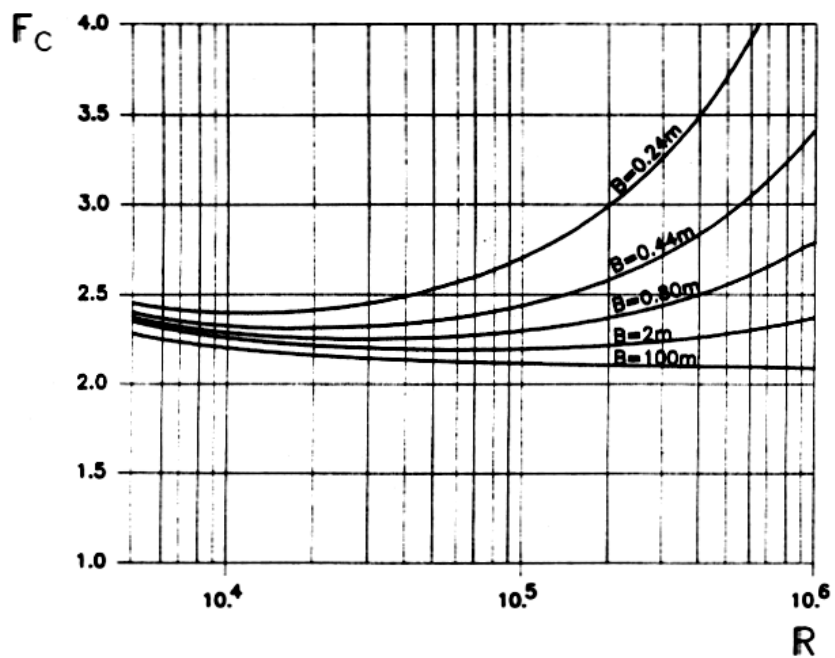


Fig. 2-13 Comportamento do Número de Froude Crítico em função de B , segundo Iwasa (apud ROSSO, SCHIARA e BERLAMONT, 1989)

A expressão geral para o fator de atrito considerando a influência da relação (F/F_c) foi proposta por ROUSE (1963) e desenvolvida por ROSSO, SCHIARA e BERLAMONT, concluindo-se pela lei geral apresentada na Eq. 2-48, onde F é o número de Froude na condição de canal estável e sub-crítico.

$$\text{Eq. 2-48} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.03 \log \left[\left(\frac{3.04}{\text{Re} \sqrt{f}} + \frac{k_s}{12.2 R_h} \right) \left(\frac{F}{F_c} \right)^{2/3} \right]$$

2.3.3 O fator de atrito e a equação de Manning

Em meados do século XIX diferentes pesquisadores chegaram a conclusão, de forma independente, que o fator de resistência de Chezy ajusta-se bem à potência (1/6) do raio hidráulico. Em 1891, Flamant atribuiu erroneamente (apud HENDERSON, 1966) a autoria da relação a Manning, definindo o parâmetro n como característico da rugosidade superficial da canalização.

$$\text{Eq. 2-49} \quad C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$$

A partir da Eq. 2-6 é possível a correlação entre os parâmetros n e k_s de Nikuradse da equação de Nikuradse (Eq. 2-41). Esta correlação é válida na faixa ($5 \leq R_h/k_s \leq 2000$) e é obtida da forma:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 2.04 \cdot \log \left(\frac{12.2 R_h}{k_s} \right) = \alpha \left(\frac{R_h}{k_s} \right)^{1/6}$$

$$\text{Eq. 2-50} \quad n = 0.041 \cdot k_s^{1/6}$$

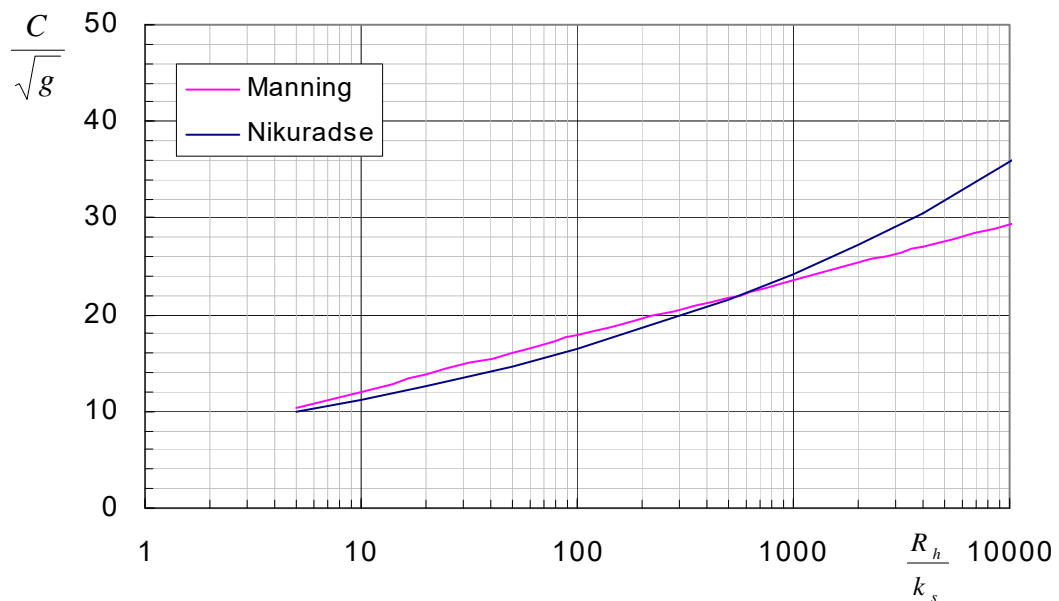


Fig. 2-14 Comparação entre os valores de Manning e K_s obtidos de Eq. 2-50

2.4 Macro-Rugosidade e o Perfil de Velocidades

2.4.1 Estudos Analíticos

MORRIS e WIGGERT (1972) apresentaram uma extensão do conceito de turbulência associada aos efeitos de parede, de forma a abranger também a rugosidade isolada ou de larga escala. O conceito de **turbulência normal**, como tratada por Colebrook e White, implica em se admitir a geração e dissipação contínua de vórtices induzidos pela dimensão característica a da rugosidade, seja a altura em relação à parede ou o espaçamento superficial. Esta dimensão caracteriza a frequência das fontes geradoras de vórtices.

Este conceito é perfeitamente válido para, por exemplo, paredes revestidas de areia com granulometria uniforme, como o modelo empregado por NIKURADSE. A perda de energia ocorre em sua maior parte durante a geração dos vórtices e o restante na

dissipação viscosa. Os processo de transferência de massa e momento, bem como o atrito viscoso se combinam para reduzir a estrutura da turbulência a um padrão típico na região central do escoamento (afastado das paredes).

Para esta **turbulência normal ou rugosa**, o perfil de velocidade é associado a uma relação logarítmica proporcional à $(1/k)$:

$$\text{Eq. 2-51} \quad \frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{a}\right) + A_N$$

Quando as paredes do conduto são lisas de tal forma que o mecanismo de geração de vórtices fica contido pela sub-camada limite viscosa, a velocidade do escoamento nas proximidades independe das dimensões características da rugosidade, porém é afetada pelas dimensões da sub-camada, que é decrescente com o número de Reynolds. Nestes casos tem-se a **turbulência lisa**, que pode ser expressa na forma :

$$\text{Eq. 2-52} \quad \frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y \cdot u_*}{\nu}\right) + A_L$$

A macro-rugosidade ou rugosidade de larga escala cria uma região de interferência, que depende da geometria da rugosidade, em particular da altura e do espaçamento dos elementos, conforme ilustra a figura seguinte. Desta forma pode-se redefinir a classificação do escoamento como escoamento **turbulento semi-liso**, quando os elementos estão suficientemente distantes, escoamento **hiper-turbulento** para a situação em que os elementos estão convenientemente próximos e, finalmente, escoamento **quase-liso**, quando a distância entre eles é pequena. Esta classificação é ilustrada na figura a seguir.

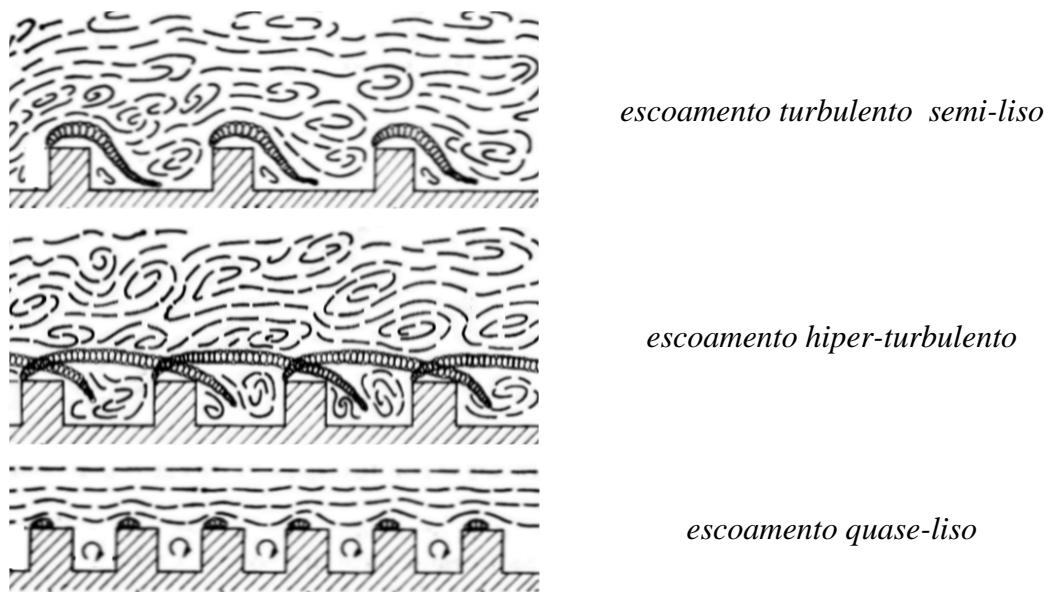


Fig. 2-15: Descrição dos regimes intermediários de escoamento (MORRIS, apud CHOW,1959)

Para estas situações intermediarias, características da macro-rugosidade, o perfil de velocidades típico da turbulência normal é deformado pela ação de vórtices com outro padrão, gerados pela particular geometria dos elementos.

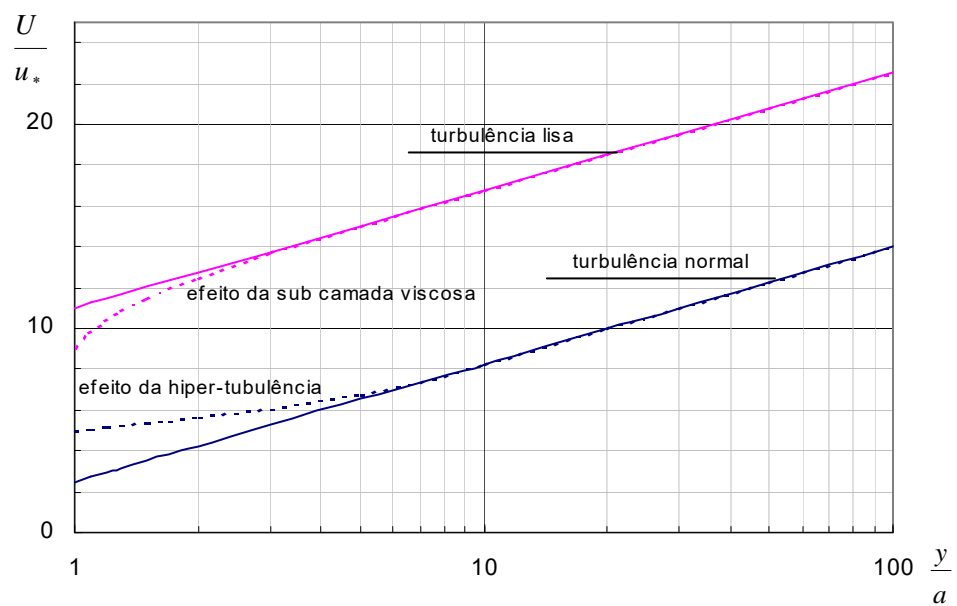


Fig. 2-16: Perfis de velocidade no escoamento turbulento afetados pelo efeito da macro-rugosidade

Para o caso de rugosidade ocasional isolada, ou seja os elementos rugosos presentes na parede estão suficientemente espaçados, a zona morta ou região de velocidade baixa criada por um obstáculo fica totalmente compreendida no intervalo entre os elementos (Fig. 2-17).

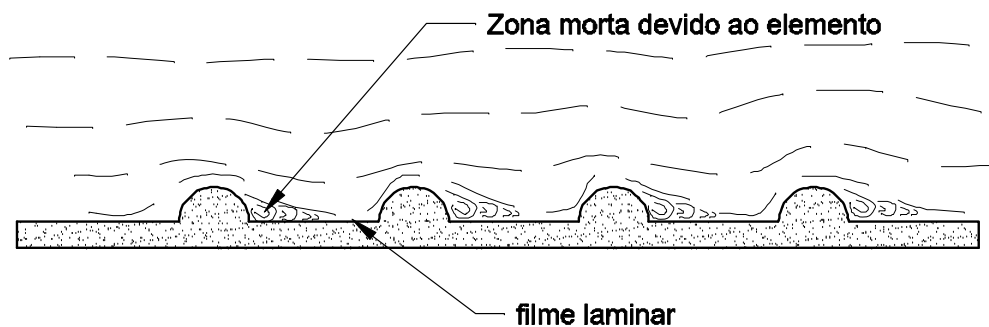


Fig. 2-17: Esquema do escoamento turbulento semi-liso

Neste intervalo o filme laminar se estabelece novamente antes do início do próximo elemento, e a resistência ao escoamento será a resultante da força de arrasto na subcamada laminar somada com a força de arrasto atuante sobre a projeção da área do elemento na direção do escoamento. O escoamento com este comportamento é dito **turbulento semi-liso**.

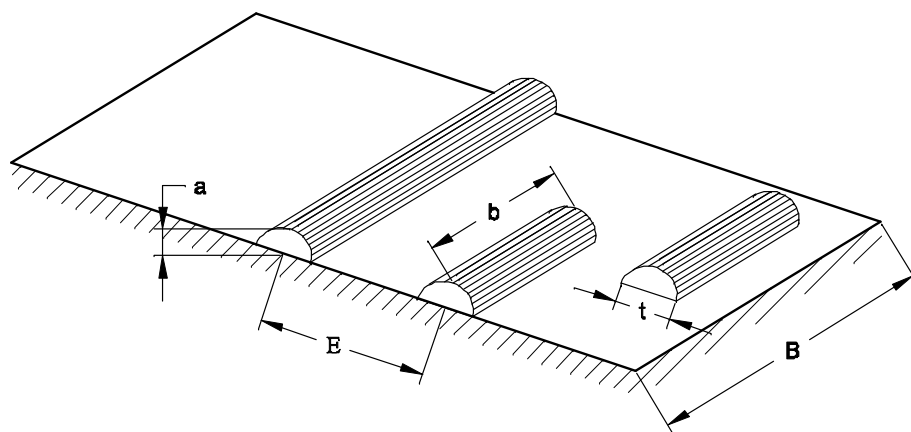


Fig. 2-18: Geometria para consideração da macro-rugosidade esparsa e na forma de faixas

A força de arrasto atuante sobre um elemento será igualada a resultante das forças de pressão de forma que:

$$F_r = C_D \frac{\rho}{2} A_r u_w^2 = \Delta p_r A$$

Para a situação unidimensional a área da seção transversal do conduto será $A = R_h \cdot P$. Dividindo-se pelo peso específico γ e computando-se a resultante para um trecho de comprimento L com elementos espaçados de E , obtém-se a perda de carga devido ao elemento rugoso considerando o escoamento semi-liso:

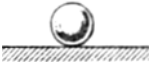

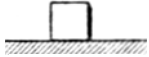

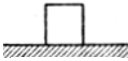






$$\text{Eq. 2-53} \quad H_{SL} = f_{SL} \frac{L}{D_h} \frac{U^2}{2g}$$

$$\text{Eq. 2-54} \quad f_{SL} = 4C_D \frac{b}{B} \frac{a}{E} \frac{u_w^2}{U^2}$$

O termo f_{SL} , o fator de atrito para o escoamento semi-liso considera as relações geométricas do elemento macro-rugoso isolado (para elementos aplicados em faixas tem-se $b/B=1$) e a relação entre a velocidade junto a parede u_w e a velocidade média apresentada por MORRIS (1971):

$$\text{Eq. 2-55} \quad \frac{u_w^2}{U^2} = 16.8 f_L$$

Tab. 2-1: Coeficientes de arrasto para elementos de macro-rugosidade (MORRIS, 1972)

RUGOSIDADE ISOLADA	TIPO DE ELEMENTO	C_D
esfera		0.50
hemisfério		0.4
cubo		1.5
cone		0.5
RUGOSIDADE DE FAIXA	TIPO DE ELEMENTO	C_D
retangular		1.9
circular		1.2
elíptica		0.5
semi-circular		0.9
triangular		1.5
CAVIDADES	TIPO DE ELEMENTO	C_D
retangular		1.0
meia-cana		0.2

Quando os elementos rugosos são suficientemente próximos para que a zona morta formada pelo elemento preencha todo o intervalo entre os elementos de forma a interferir no próximo elemento tem-se o **escoamento hiper-turbulento**. Nesta situação, no interior da região compreendida entre a parede e a altura cE forma-se uma sub-camada hiper-turbulenta na qual o perfil de velocidades se altera. A resistência ao escoamento pode ser computada considerando-se a lei de velocidades na sub-camada hiper-turbulenta de espessura cE e a parcela da camada turbulenta normal:

$$\frac{u}{u_*} = \Psi \ln\left(\frac{y}{E}\right) + A_w \quad (\text{perfil na sub-camada hiper-turbulenta})$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{E}\right) + A \quad (\text{perfil na sub-camada turbulenta normal})$$

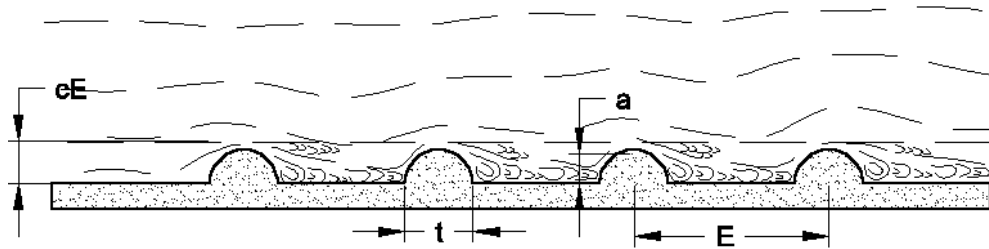


Fig. 2-19: Esquema do escoamento hiper-turbulento

Integrando-se o perfil de velocidades no intervalo $[0-cE]$ e $[cE-h]$ resulta:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{\frac{1}{A} \int u dA}{u_*} = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{u}{u_*} dy$$

Efetuada a integração para condutos circulares e admitindo as constantes usuais derivadas do regime turbulento normal, MORRIS obteve uma relação para condutos forçados da forma:

$$\text{Eq. 2-56} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} - 2 \log \frac{R}{E} = 1.75 + \frac{\sqrt{2}}{4} (2.5 - \psi) \left(2 \frac{cE}{R} - \frac{1}{2} \left(2 \frac{cE}{R} \right)^2 \right)$$

onde os parâmetros ψ e c estão relacionados à geometria dos elementos rugosos e ao número de Reynolds. Este conceito é interessante pois pode ser aplicado ao caso da macro-rugosidade constituída pelos elementos de fundo.

Em superfícies compostas por pequenas depressões ou elementos rugosos muito próximos, tem-se o comportamento de uma parede pseudo-lisa. Os vórtices formados nas cavidades ou grutas¹ tem um comportamento estável, absorvendo a energia do

¹ A literatura especializada faz referência a esta cavidade com o termo inglês *grove* que pode ser traduzido por *gruta*.

escoamento principal e dissipando continuamente no movimento rotacional (MORRIS, 1972). Esta condição é típica do **escoamento quase-liso**.

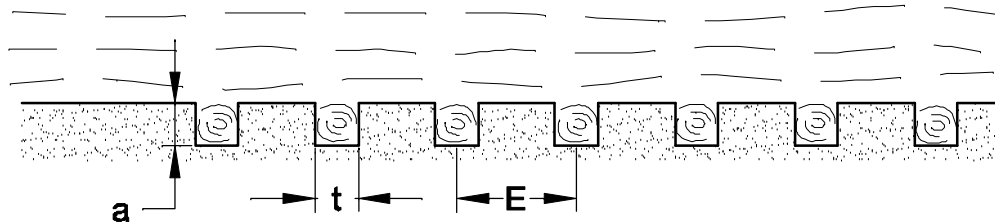


Fig. 2-20: Esquema do escoamento quase-liso

A dissipação de energia ao longo da extensão L pode ser determinada pela soma da dissipação isolada no interior de cada cavidade, admitindo-se a velocidade de rotação dos vórtices cilíndricos constante e igual a $v_r = c_w \cdot u_w$, sendo c_w uma constante de transferência. Como B é o comprimento dos vórtices, a potência total no vórtice é:

$$W = \frac{\rho B t (c_w u_w)^3}{8}$$

e perda de carga numa extensão de comprimento L será dada por

$$\text{Eq. 2-57} \quad H_{QL} = f_{QL} \frac{L U^2}{D 2g}$$

$$\text{Eq. 2-58} \quad f_{QL} = \frac{b}{B} \frac{t}{a} \left(\frac{c_w u_w}{U} \right)^3$$

O termo f_{QL} é o fator de atrito para o escoamento quase-liso, sendo as relações b/B e t/a os índices indicadores das características geométricas da rugosidade.

2.4.2 Estudos Experimentais

O'LOUGHLIN e ANNAMBHOTLA (1968) verificaram, a partir de resultados de medições próximas ao fundo de canais dotados de macro elementos, que as deformações sofridas pelo perfil de velocidades nestas condições afetam as tensões tangenciais u^* . A figura Fig. 2-21 mostra os perfis obtidos pelos pesquisadores considerando diferentes distribuições de elementos isolados e esparsos, cujo arranjo é definido pelo parâmetro de *densidade* λ da Eq. 2-59, onde n representa o número de elementos, A_r a área frontal ao escoamento do elemento e E o espaçamento entre os elementos.

$$\text{Eq. 2-59} \quad \lambda = \frac{nA_r}{E}$$

Foram consideradas duas regiões no interior da camada limite turbulenta: a parte externa, denominada *outer layer* e a parte interna, de espessura \underline{a} , denominada *wake layer*. Esta última corresponde a sub-camada hiper-turbulenta descrita por MORRIS e WIGGERT (1972).

O tratamento analítico empregado considera a resultante das forças de arrastamento na sub-camada hiper-turbulenta em função de um coeficiente C_D , definido como na equação Eq. 2-60, onde u é a velocidade a uma distância y acima do fundo, y' a profundidade para a qual a velocidade é zero e \underline{a} a altura dos elementos rugosos.

$$\text{Eq. 2-60} \quad C_D = \frac{F_D}{\rho \frac{a}{2} \int_{y'}^{a-y'} u^2 dy}$$

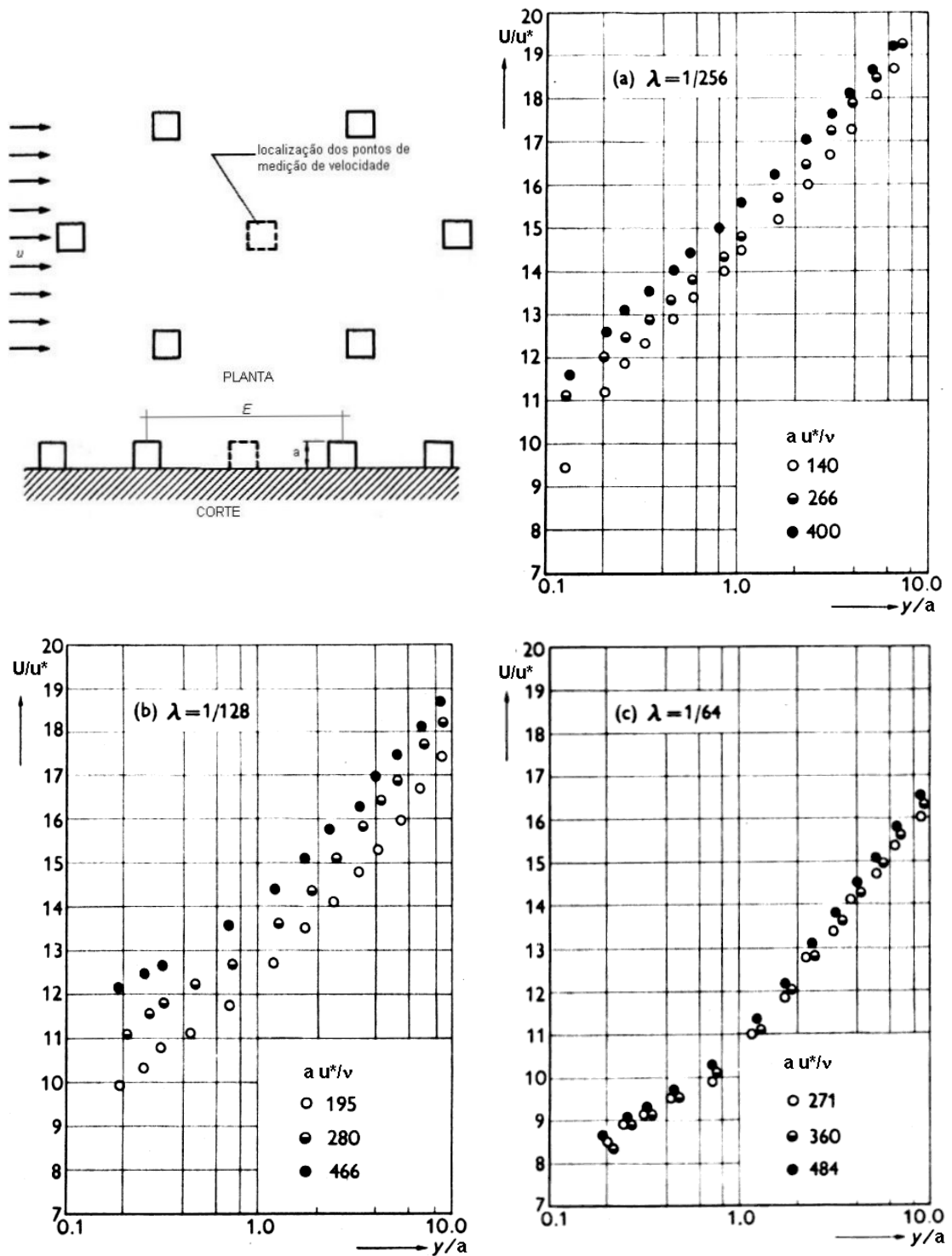


Fig. 2-21: Distribuições de elementos macro-rugosos e perfil de velocidade segundo O'LOUGHLIN e ANNAMBHOTLA (1968), para canais com rugosidade de larga escala de altura a e densidade λ

A equação resultante para o perfil de velocidades toma a forma de um termo adicional na distribuição logarítmica clássica, e depende de parâmetros geométricos

dos elementos rugosos e do escoamento. A equação proposta por O'LOUGHLIN e ANNAMBHOTLA tem a forma abaixo.

$$\text{Eq. 2-61} \quad \frac{u}{u_*} = A \log\left(\frac{y}{pa}\right) + A \frac{(1 - \frac{1}{2} pa / y_0)}{(1 - pa / y_0)} + M \sqrt{\frac{\tau_s}{\tau_0}}$$

O termo a , já definido, é a altura geométrica dos elementos, τ_s é a tensão tangencial média entre os elementos de rugosidade, τ_0 é a tensão tangencial total na seção, p é um coeficiente de definição da espessura da camada hiper-turbulenta, y_0 a profundidade do escoamento e M um adimensional para caracterizar a influência da viscosidade, função da tensão média de atrito τ_s e da espessura da subcamada limite viscosa δ' .

$$\text{Eq. 2-62} \quad M = \frac{\sqrt{\tau_s / \rho \cdot \delta'}}{\nu}$$

O modelo proposto por O'LOUGHLIN e ANNAMBHOTLA tem a mesma estrutura logarítmica da equação de *von Karman – Prandtl* para tubos rugosos, porém introduz um termo equivalente de transição, na qual existe a influência da viscosidade.

Nesta mesma linha de interpretação, COLEMAN e ALONSO (1981) propuseram corrigir o perfil de velocidades logarítmico de forma a adaptá-lo ao efeito de rugosidade de larga escala portanto válido para toda a banda de profundidade do escoamento. Para tal são empregados em conjunto os modelos de CEBECI e SMITH, CEBECI e CHANG e FINLEY (apud COLEMAN e ALONSO, 1981), que resulta numa forma semelhante ao resultado de MORRIS & WIGGERT.

No resultado de COLEMAN e ALONSO empregou-se a seguinte mudança de variáveis:

$$U^+ = \frac{u}{u_*} \quad \text{Velocidade de Atrito adimensional}$$

$$y^+ = \frac{y}{\nu/u_*} = \frac{u_* y}{\nu} \quad \text{Profundidade adimensional}$$

$$\delta^+ = \frac{\delta}{\nu/u_*} = \frac{u_* \delta}{\nu} \quad \text{Espessura adimensional da camada limite no escoamento livre}$$

$$K^+ = \frac{k \cdot u_*}{\nu} \quad \text{Altura adimensional do elemento de rugosidade}$$

A equação final proposta para escoamentos livres está apresentada abaixo (Eq. 2-63) e o termo Π considera a geometria e k^+ a altura da rugosidade de fundo.

$$\text{Eq. 2-63} \quad U^+ = \frac{2.302}{k} \log y^+ + 5.24 + \left(\frac{y^+}{\delta^+}\right)^2 \left(1 - \frac{y^+}{\delta^+}\right) + \left(\frac{2\Pi}{k^+}\right) \left(\frac{y^+}{\delta^+}\right) \left(3 - 2\left(\frac{y^+}{\delta^+}\right)\right)$$

Testes realizados por COLEMAN e ALONSO, tanto em condutos livres como forçados indicam uma razoável aderência do modelo aos pontos observados, conforme ilustra a Fig. 2-22. Nestes testes os valores de Π foram obtidos por ajuste dos resultados experimentais e δ^+ foi admitido como sendo $0.9y^+$. Os autores citados recomendam o desenvolvimento de testes específicos de laboratório para a correlação dos parâmetros geométricos da tubulação e rugosidade em função de δ e Π .

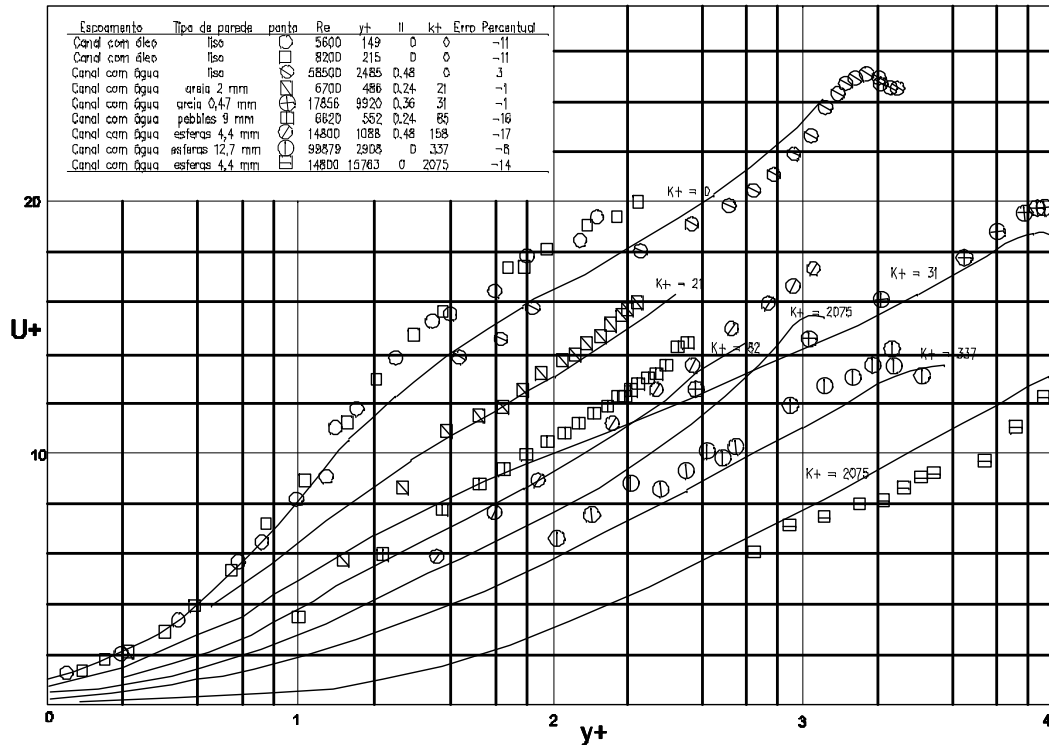


Fig. 2-22: Verificação Experimental do Modelo de COLEMAN e ALONSO (1981)

KIRKGÖZ (1989), utilizando um anemômetro Doppler-laser desenvolveu uma série ensaios para medição do perfil de velocidades em canais com fundos liso e rugoso com o intuito de confirmar as deformações apresentadas nos perfis logarítmicos por influência da sub-camada hiper-turbulenta. O modelo analisado é semelhante ao discutido por MORRIS e WIGGERT, considerando o deslocamento do ponto zero do perfil de velocidades de uma relação Δz (Fig. 2-23), e mais um termo corretivo relativo ao efeito da rugosidade.

Eq. 2-64

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{u_*(z + \Delta z)}{\nu}\right) + B - \frac{\Delta u}{u_*}$$

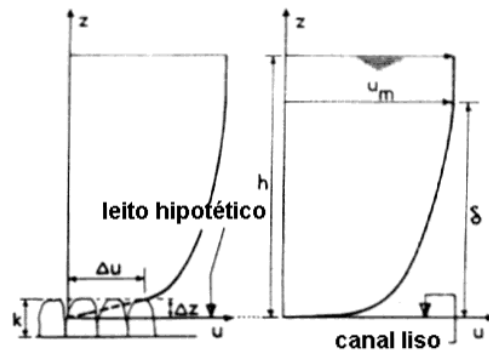


Fig. 2-23: Esquema do perfil de velocidade adotado por KIRKGÖZ(1989)

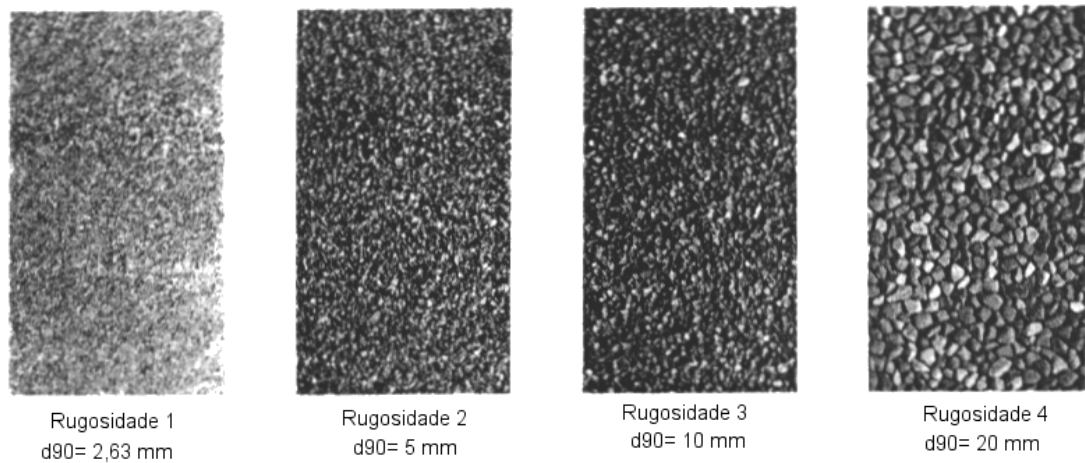


Fig. 2-24: Rugosidade típica empregada nos testes de KIRKGÖZ (1989)

Os resultados obtidos para diferentes rugosidades e vários números de Reynolds estão indicados na figura Fig. 2-25 em termos de z/δ (ponto de velocidade máxima) e (u/u_{\max}) e a velocidade máxima.

Para canais *lisos* confirmou-se a equação logarítmica, resultando no valor 0.41 para o coeficiente de *von Karman*.

Eq. 2-65
$$\frac{u}{u_*} = 2.44 \cdot \ln\left(\frac{z \cdot u_*}{\nu}\right) + 5.5$$

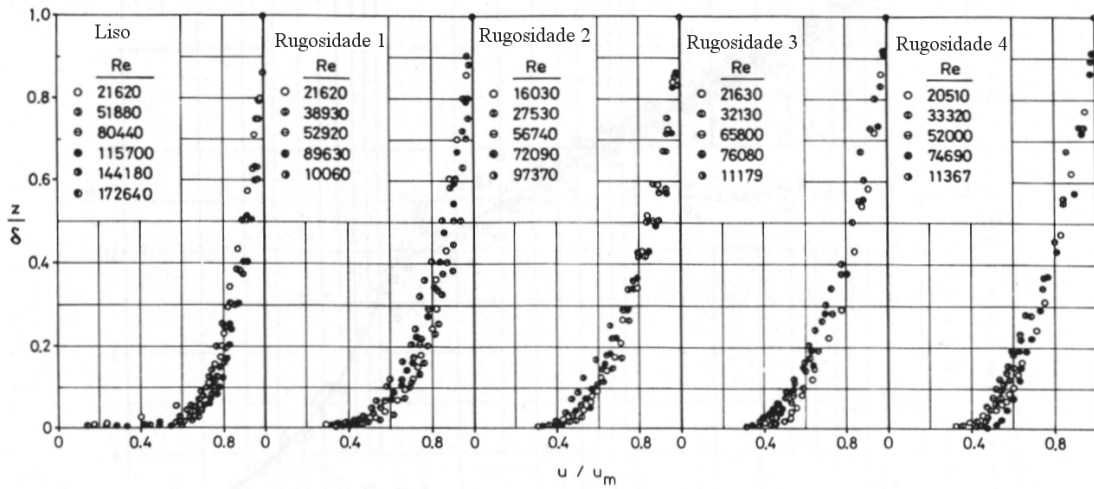


Fig. 2-25 Perfis de Velocidade obtidos por KIRKGÖZ (1989)

No caso dos canais *rugosos*, a expressão Eq. 2-65 é acrescida do deslocamento do perfil de velocidades Δz e da correção $\Delta u/u_*$, obtidas a partir do ajuste dos dados experimentais, conforme indicam as figuras a seguir.

Eq. 2-66
$$\frac{u}{u_*} = 2.44 \ln\left(\frac{u_*(z + \Delta z)}{\nu}\right) - 0.8 - \frac{\Delta u}{u_*}$$

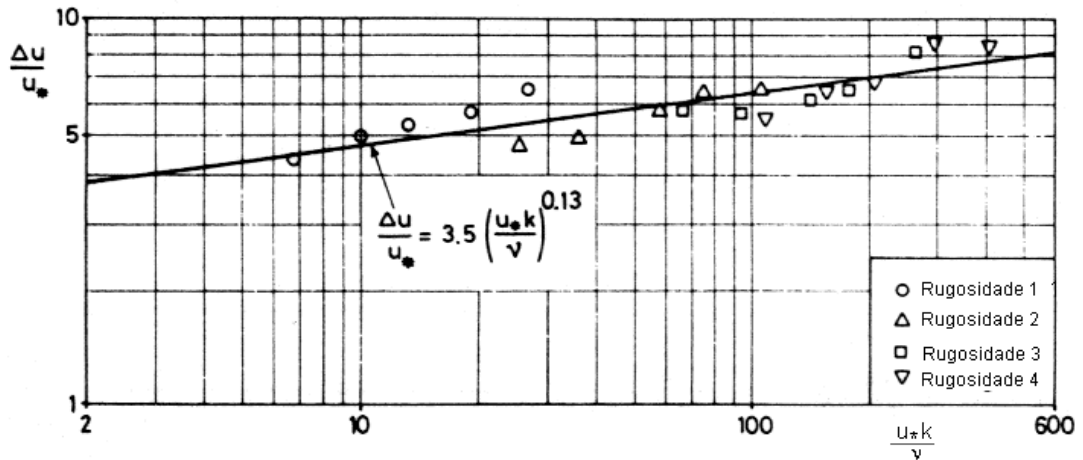


Fig. 2-26: Valores $\Delta u/u_*$ segundo KIRKGÖZ (1989)

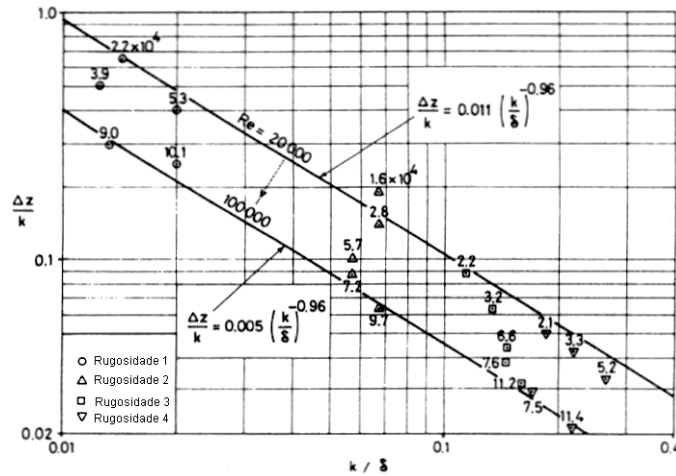


Fig. 2-27: Valores experimentais para Δz (apud KIRKGÖZ ,1989)

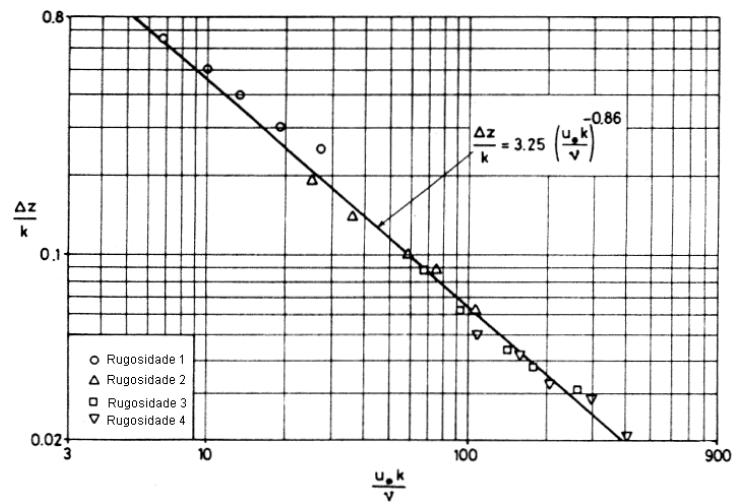


Fig. 2-28: Valores experimentais de $\Delta z/k$

2.5 Escoamento não Uniforme em Canais

Toda a análise clássica da resistência ao escoamento é feita a partir do escoamento uniforme, uma situação particular na qual o gradiente energético se iguala à inclinação de fundo da canalização. Em outras palavras, esta consideração equivale ao paralelismo entre o fundo da canalização, a superfície livre e a linha de energia.

2.5.1 Equações Fundamentais

A abordagem tradicional do escoamento não uniforme pode ser feita de forma indiferente através do princípio da energia ou do equilíbrio de momento. A precisão e a acuracidade de ambas as formas de análise dependem da correta estimativa dos coeficientes de Coriolis e de Boussinesq, conforme explica FIELD, LAMBERT e WILLIAMS (1997).

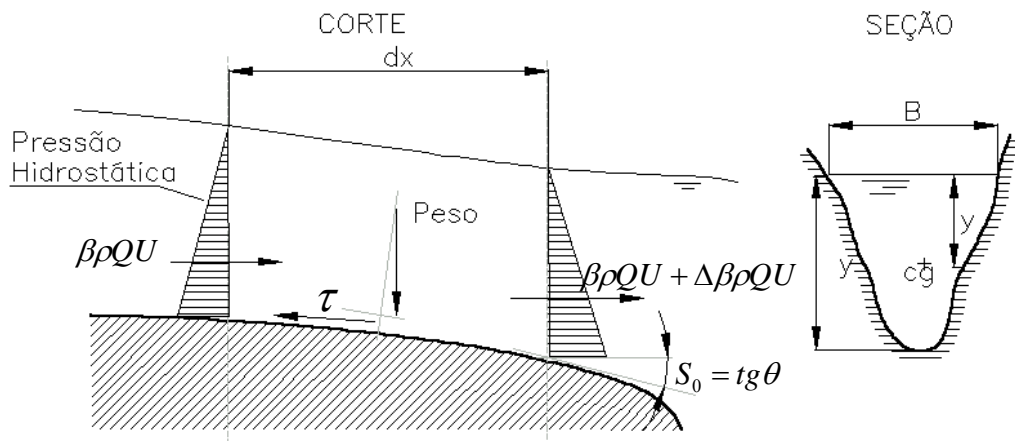


Fig. 2-29: Conservação de massa e equilíbrio de forças no escoamento não uniforme

A conservação da Massa

O princípio da conservação da massa admite como hipóteses a incompressibilidade e o paralelismo das velocidades e, em sua forma diferencial pode ser escrita por:

$$\text{Eq. 2-67} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta x A_{12}) - \rho U_1 A_1 + \rho U_2 A_2 - \rho Q_L \cong 0$$

onde A_{12} é uma área média entre as seções 1 e 2 e Q_L é o fluxo de contribuição lateral. Tomando-se o limite quando $\Delta x \rightarrow 0$, do primeiro membro da Eq. 2-67, após a divisão $\rho \Delta x$, ter-se-á realmente o primeiro membro igual a zero, isto é:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{\partial}{\partial t} (A_{12}) + \frac{Q_2 - Q_1}{\Delta x} - \frac{Q_L}{\Delta x} \right] \cong 0$$

Eq. 2-68 $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$

onde "q" é a vazão de contribuição lateral por unidade de comprimento x [m³/m.s]

O Equilíbrio de Momento

O somatório dos esforços externos atuantes sobre o volume de controle corresponde ao fluxo de quantidade de movimento e pode ser expresso pela expressão de Newton

Eq. 2-69
$$\sum \overset{F}{F}_{ex_{sup}} + \int_{\forall C} \overset{F}{\rho B} d\forall = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\forall C} \overset{F}{\rho U} d\forall + \int_{SC} \overset{F}{\rho U} (\overset{F}{U} \cdot d\overset{F}{A})$$

As hipóteses são mais restritivas e consideram: (a) Fluido incompressível, (b) τ_o uniforme ao longo do perímetro molhado, (c) θ é um ângulo pequeno para que $|\text{sen}\theta| \cong |\text{tg}\theta| = i$ e (d) a pressão distribui-se hidrosticamente.

A projeção da Eq. 2-69 na direção paralela ao fundo do canal (direção x) permite o detalhamento de cada parcela:

$$\sum \overset{x}{F}_{ex_{sup}} \cong \rho g \bar{y}_1 A_1 - \rho g \bar{y}_2 A_2 - P_{12} \Delta x \tau_0 + (A_2 - A_1) \rho g \bar{y}_{12}$$

$$\int_{\forall C} \overset{F}{\rho B} d\forall \cong \rho g A_{12} \Delta x |\text{sen}\theta|$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\forall C} \overset{F}{\rho U} d\forall \cong \frac{\partial}{\partial t} (\rho U_{12} A_{12} \Delta x)$$

$$\int_{SC} \rho \vec{U} (\vec{U} \cdot d\vec{A}) \cong -\rho \beta_1 Q_1 U_1 + \rho \beta_2 Q_2 U_2$$

Reunindo as passagens anteriores em Eq. 2-69 obtém-se

$$\begin{aligned} -\rho g (\bar{y}_2 A_2 - \bar{y}_1 A_1) - P_{12} \Delta x \tau_0 + (A_2 \bar{y}_1 - A_1 \bar{y}_1) \rho g + \rho g A_{12} \Delta x |\text{sen } \theta| \cong \\ \cong \frac{\partial}{\partial t} (\rho U_{12} A_{12} \Delta x) + \rho (\beta_2 Q_2 U_2 - \beta_1 Q_1 U_1) \end{aligned}$$

Divide-se esta equação por $\rho \Delta x$ e toma-se o limite para $\Delta x \rightarrow 0$ de ambos os membros obtém-se:

Eq. 2-70
$$-g \frac{\partial}{\partial x} (A \bar{y}) + g \bar{y} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_y - \frac{P \tau_0}{\rho} + g A |\text{sen } \theta| = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)$$

Considerando os dois primeiros termos da Eq. 2-70 tem-se que $A = A(y(x), x)$ e também que $\bar{y} = \bar{y}(y(x), x)$ e então:

$$-g \left[\frac{\partial}{\partial y} (A \bar{y}) \right] \frac{\partial y}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial x} (A \bar{y}) \Big|_y + g \frac{\partial}{\partial x} (A \bar{y}) \Big|_y$$

Com o auxílio mudança de variável indicada na Fig. 2-30 demonstra-se que:

$$A \bar{y} = \int_0^y (y - \eta) B(\eta) d\eta$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (A \bar{y}) = \frac{\partial}{\partial y} \int_0^y (y - \eta) B(\eta) d\eta = \int_0^y B(\eta) d\eta = A$$

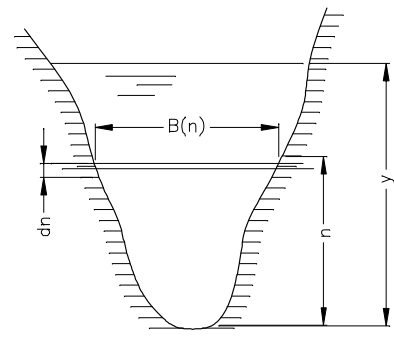


Fig. 2-30: Mudança de variável

Fazendo-se as substituições para o momento estático da seção, tensão tangencial e inclinação de fundo resulta a equação Eq. 2-71 que, em conjunto com a equação Eq. 2-68, compõe as *Equações de Saint-Venant*.

$$\frac{P}{\rho} \tau_0 = gAS_f \quad |\text{sen } \theta| = |\tan \theta| = -dz_0/dx$$

$$\text{Eq. 2-71} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0$$

O coeficiente β é, de Boussinesq pode ser determinado por:

$$\text{Eq. 2-72} \quad \beta = \frac{1}{AU^2} \int_A u^2 dA$$

2.5.2 O Escoamento Permanente

No caso particular dos escoamentos permanentes, as equações básicas resumem-se à equação Eq. 2-71 de onde se pode desprezar o termo $\partial Q/\partial t$:

$$\text{Eq. 2-73} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f = 0$$

Desenvolvendo a equação acima em todos os seus termos obtém-se:

$$\frac{Q^2}{A} \frac{\partial \beta}{\partial x} + 2\beta \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \beta \frac{Q^2}{A^2} \left[\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_{h=\text{const}} \right] + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f = 0$$

que pode ser simplificada para a Eq. 2-74, base do método de análise experimental empregado neste trabalho.

$$\text{Eq. 2-74} \quad \frac{Q^2}{A} \frac{\partial \beta}{\partial x} + 2\beta \frac{Q}{A} q + gA(1 - \beta F_r^2) \frac{\partial h}{\partial x} - \beta \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_{h=\text{const}} + gAS_f = 0$$

2.5.3 A resistência ao Escoamento no Movimento Não Uniforme

As tensões tangenciais junto ao fundo não apresentam o mesmo comportamento observado nos escoamentos uniformes. ALFZALIMEHR e ANCTIL (1999) mostraram, através de ensaios em canais com fundo rugosos, que os perfis das tensões tangenciais ao longo da vertical são diferentes para escoamentos acelerados e desacelerados.

A interpretação física apresentada pelos autores considera que, se a profundidade aumenta no sentido do escoamento (escoamento desacelerado), as pressões aumentam no mesmo sentido e também as tensões tangenciais ao longo da vertical. No caso contrário, o efeito é inverso. O perfil apresentado na Fig. 2-31, obtido da medição direta das tensões de Reynolds ilustra esta interpretação.

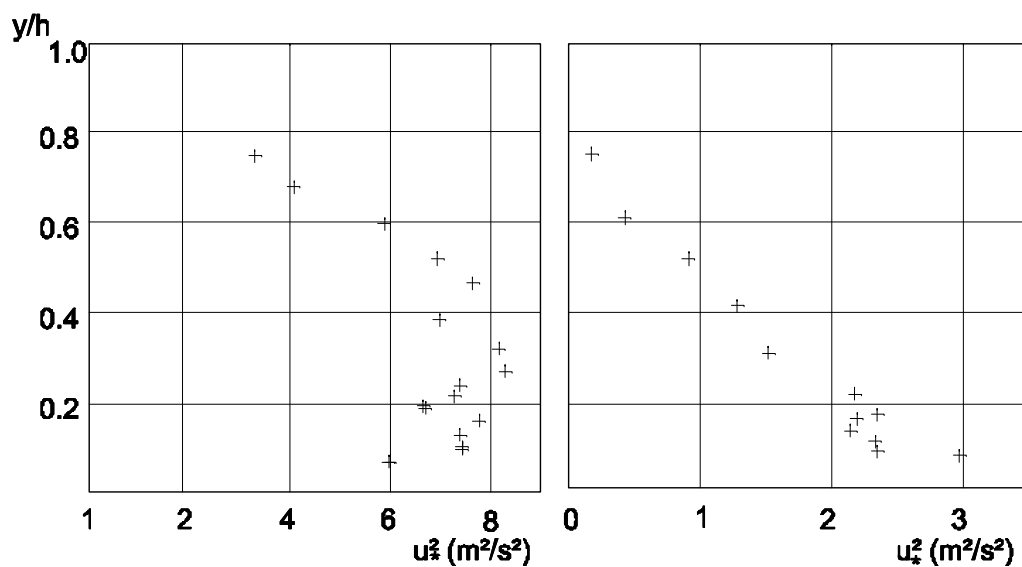


Fig. 2-31: Perfil das Tensões Tangenciais para escoamentos desacelerados (a) e acelerados (b), ALFZALIMEHR, ANCTIL (1999)

A conclusão mais importante apresentada no trabalho de ALFZALIMEHR e ANCTIL (1999) diz respeito à comparação da metodologia de avaliação das tensões

tangenciais ou da velocidade de atrito através do emprego de três técnicas e sua comparação com a medição direta. As técnicas testadas foram (a) perfil logarítmico de velocidades, (b) perfil parabólico e (c) método global.

O emprego do perfil logarítmico já foi discutido anteriormente. O perfil parabólico é pouco empregado na prática e o método global consiste na determinação indireta das tensões a partir da equação da energia, conforme o proposto por CHOW (1959).

Eq. 2-75
$$S_f = S_0 - \frac{dh}{dx}(1 - F_r^2)$$

Os resultados da comparação estão apresentados na ilustração da Fig. 2-32. Tanto a determinação das tensões de atrito considerando o perfil logarítmico, o perfil parabólico e o método global ajustam-se perfeitamente bem aos valores medidos. Esta conclusão é fundamental para justificar o método desenvolvido e empregado para a análise experimental apresentada nos capítulos subseqüentes.

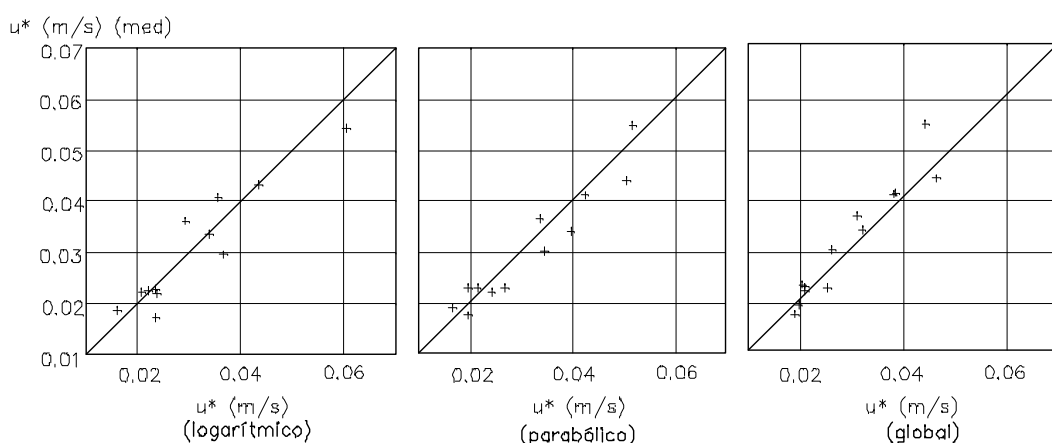


Fig. 2-32: Comparação dos métodos de determinação das tensões tangenciais (ALFZALIMEHR, ANCTIL (1999))

Um resultado interessante apresentado pelos autores é a comparação do perfil de velocidade medido e o ajustado a partir de um modelo de distribuição logarítmica de velocidades para um canal. Foi empregado o conceito da espessura de camada hiper turbulenta w e o diâmetro característico d_{50} para parametrização da rugosidade, conforme ilustrado na Fig. 2-33.

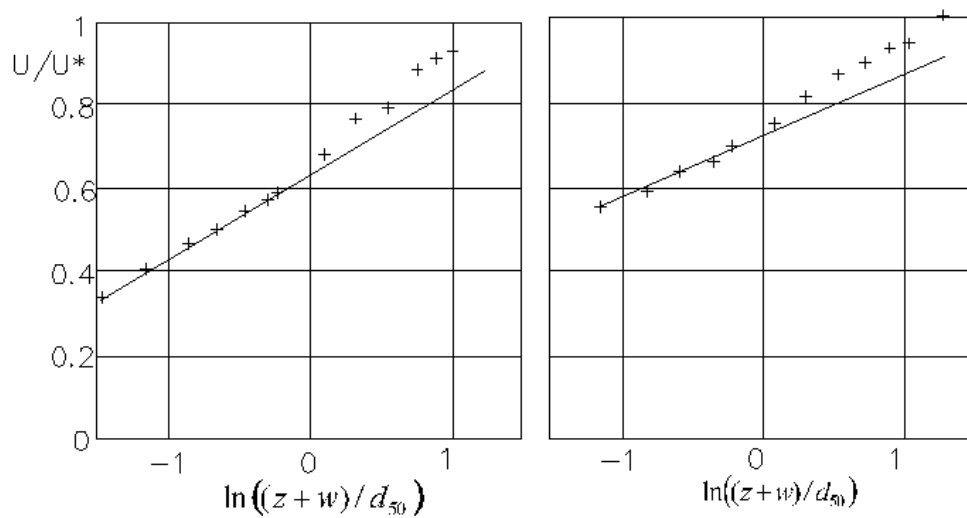


Fig. 2-33: Perfil de Velocidade medido e calculado através da lei logarítmica. (ALFZALIMEHR & ANCTIL, 1999)

3 ESTUDOS SOBRE MACRO-RUGOSIDADE EM CANAIS

3.1 Introdução

O emprego de macro-rugosidade de fundo em canais tem como objetivo aumentar a resistência ao escoamento e portanto a perda de carga. Diminui-se assim a velocidade, melhorando as condições de estabilidade do leito, navegação e etc. A constatação empírica de que estes elementos introduziam considerável perda de carga para pequenas relações y/a , sendo a a altura do obstáculo e tem pouco ou quase nenhum efeito para altos valores de y/a motivou inúmeras pesquisas a respeito.

Desde o início da década de 1960, diversos autores se esforçaram para caracterizar o efeito da resistência ao escoamento em canais, proporcionado por elementos de grandes dimensões aplicados no fundo das canalizações, a denominada *rugosidade de larga escala*, em contraposição à rugosidade de parede, de *pequena escala*.

Um grande número de trabalhos, enfocando o problema através da distribuição de velocidades, abordou o emprego de blocos de altura e espaçamento variáveis, tanto longitudinal como transversalmente. É interessante notar que, até onde vai o conhecimento do autor, nenhuma pesquisa específica trata do tema específico do emprego de travessões de fundo como instrumento corrente de condicionamento de fluxo, antes da iniciada por BRIGHETTI e CASTILHO (1998), e que tem continuidade neste trabalho.

A rugosidade de larga escala, também referenciada aqui como macro-rugosidade, é constituída de elementos de geometria uniforme, aplicados ao fundo do canal. As formas geométricas são variadas, desde pilares circulares dispostos verticalmente, elementos de forma circular dispostos horizontalmente no fundo e finalmente blocos com seções geométricas regulares como retangulares, triangulares e trapezoidais, com espaçamentos variados.

Tendo em vista as imposições construtivas, as aplicações usuais empregam elementos de seção retangular do tipo paralelepípedo ou travessões. Os primeiros são construídos em concreto e dispostos no fundo do canal. Já os segundos podem ser executados a partir de escavação em fundos rochosos, pré-moldados de concreto, moldados *in-situ* e ainda com gabiões.

Nas aplicações desenvolvidas por BRIGHETTI et al (1998), os elementos componentes da rugosidade de larga escala seriam obtidos através de escavação em rocha diretamente sobre o leito dos canais da Hidrovia do Rio Araguaia, Brasil.

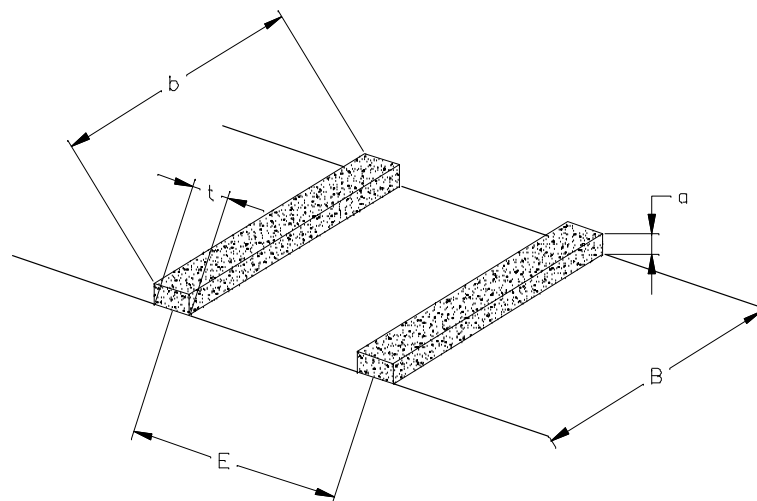


Fig. 3-1: Travessões (BRIGHETTI et alli, 1998)

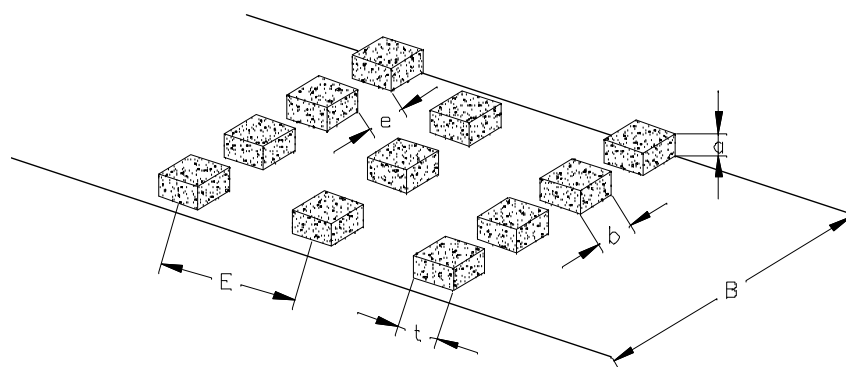


Fig. 3-2: e Blocos de fundo (SAYRE e ALBERTSON, 1961)

3.2 Trabalho de Sayre e Albertson

Em 1961, SAYRE e ALBERTSON publicaram os resultados de pesquisas próprias e comparações com dados diferentes pesquisadores americanos, com o objetivo estabelecer uma lei matemática para o cálculo de canais com rugosidade artificial de larga escala.

O trabalho original fundamenta-se em 27 ensaios realizados em laboratório com um canal de declividade variável de 2.40 x 0.60 m aproximadamente, nos quais foram aplicados blocos de fundo com diferentes distribuições, conforme ilustra a Fig. 3-2. A resistência ao escoamento, para cada configuração de rugosidade foi obtida a partir da imposição do regime uniforme, isto é, profundidade constante ao longo do canal, de tal forma que a inclinação de fundo resulta diretamente na declividade da linha de energia.

Os autores ajustaram os resultados de cada configuração ensaiada a uma lei logarítmica como a da Eq. 3-1, determinando o de interceptação C_2 da reta resultante conforme indica a Tab. 3-1. Este coeficiente foi então convertido no *parâmetro de rugosidade* χ através da relação Eq. 3-2, que é um indicador característico da configuração da rugosidade. Sendo este termo dimensional, os autores correlacionaram a relação $\psi=(\chi/a)$ com as demais variáveis geométricas envolvidas tais como o espaçamento transversal, longitudinal e comprimento dos blocos. O novo termo foi denominado *relação de espaçamento*.

$$\text{Eq. 3-1} \quad \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{U}{u_*} = 6.06 \log \frac{y_n}{a} + C_2$$

$$\text{Eq. 3-2} \quad C_2 = 6.06 \log \frac{a}{\chi}$$

$$\text{Eq. 3-3} \quad \Psi = \frac{\chi}{a} = f\left(\frac{ab}{E(e+b)}\right)$$

A Fig. 3-3 apresenta a correlação obtida em função de (y_n/χ) . os resultados dos ensaios realizados e os valores de χ para cada configuração de rugosidade. O coeficiente angular da reta semilogarítmica, diferente do valor 5,75 estabelecido pela lei logarítmica, foi interpretado pelos autores como resultante da variação do coeficiente de *von Karman*, entre 0,37-0,38.

Tab. 3-1 Valores de C_2 da Expressão de SAYRE e ALBERTSON

E/a	t/a				
	3.9	11.8	2	7	15
2	-1.05	0.96			
4				5.60	
6	0.11	1.77			
8					8.70
10			0.17		
18	2.59	4.85			

A comparação dos resultados experimentais com a tradicional fórmula de Manning indica que a mesma não é apropriada para a interpretação do comportamento do escoamento, mesmo na pequena faixa de (Y_n/a) analisada. Os autores constataram que a distribuição vertical das velocidades, quando a densidade de blocos é alta, assemelha-se em forma à de von Karman-Prandtl e sugerem que os resultados podem ser aplicados mesmo para relações quando $(b/B) \rightarrow 1$.

O trabalho de SAYRE e ALBERTSON traz uma importante contribuição, pelo pioneirismo e definição do padrão geométrico da rugosidade artificial de larga escala. Alguns pontos não são explicados, principalmente o comportamento dos resultados experimentais para relações $Y_n/a > 10$.

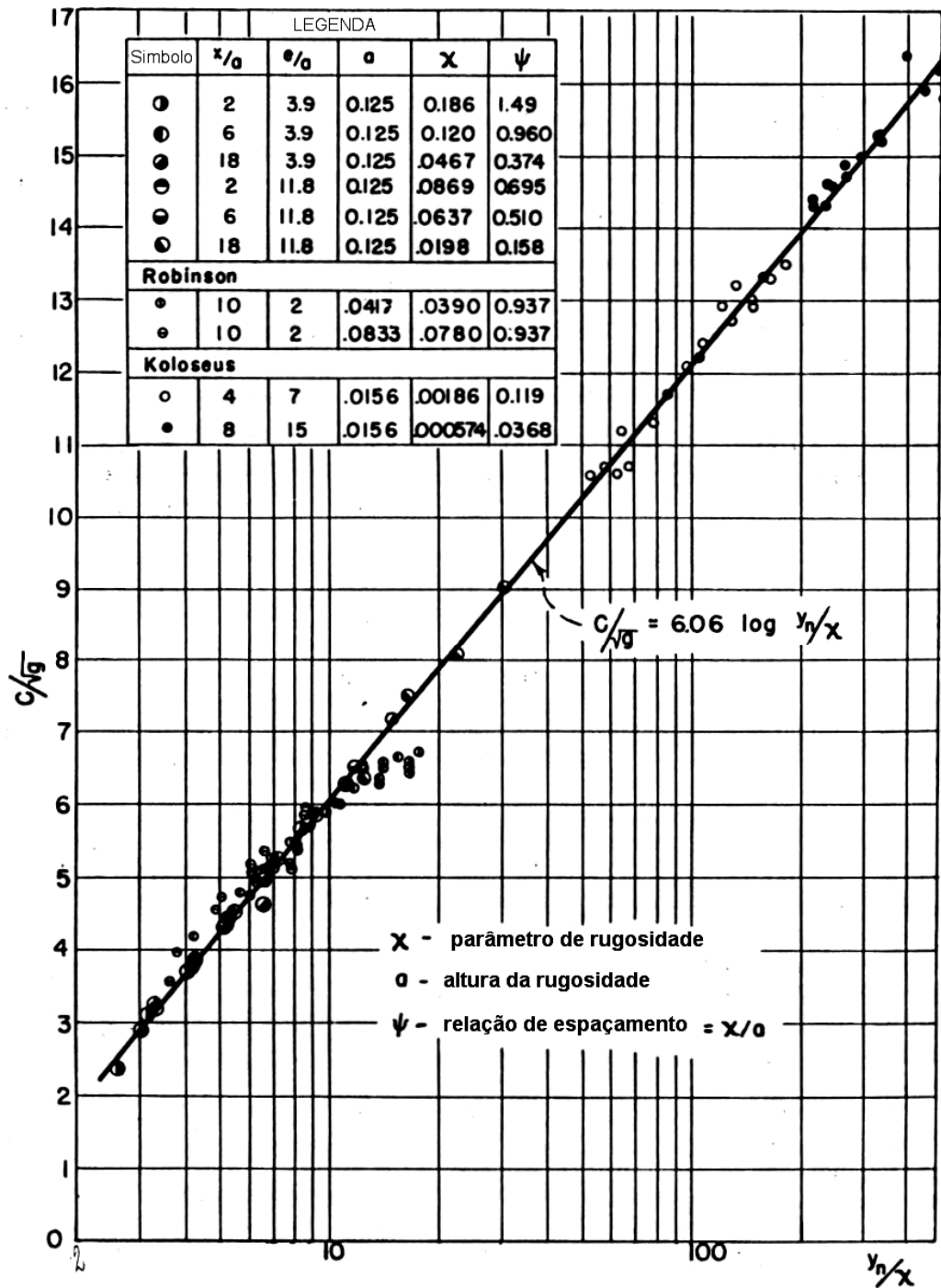


Fig. 3-3: Resultados Experimentais de SAYRE e ALBERTSON (1961)

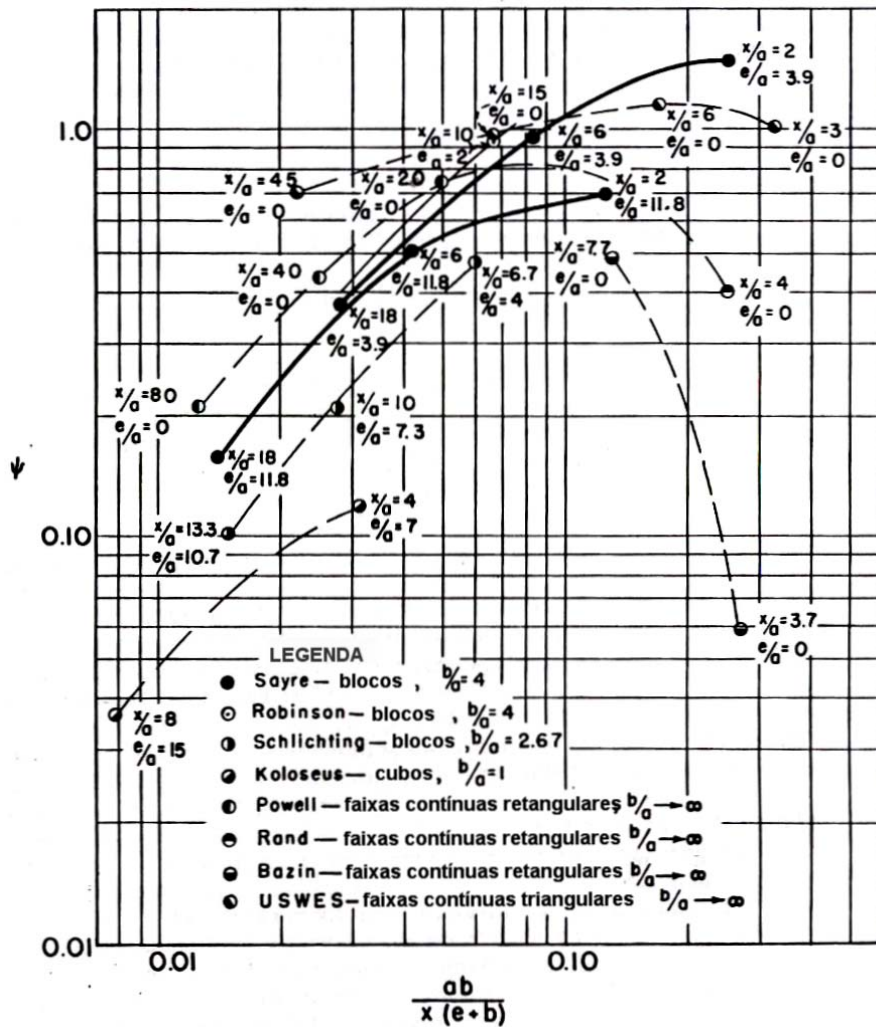


Fig. 3-4: Relação de Espaçamento ψ de SAYRE e ALBERTSON

BIERY e DELLEUR, em contribuição ao trabalho de SAYRE e ALBERTSON apresentaram resultados de testes para macro-rugosidade na forma de barras de seção circular de 6,3 mm de diâmetro, dispostas longitudinal e transversalmente no fundo do canal.

Devido às características dos elementos utilizados, (barras situadas a uma pequena altura em relação ao fundo) os autores constataram uma grande deformação do perfil de velocidades, entretanto a relação entre U/u^* e y/a apresenta uma lei similar a encontrada por de SAYRE e ALBERTSON, como pode ser visto na Fig. 3-7.

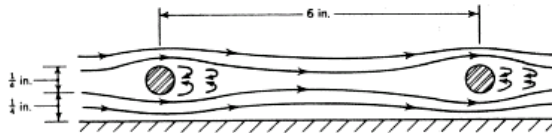


Fig. 3-5: Comportamento do fluxo ao redor das barras

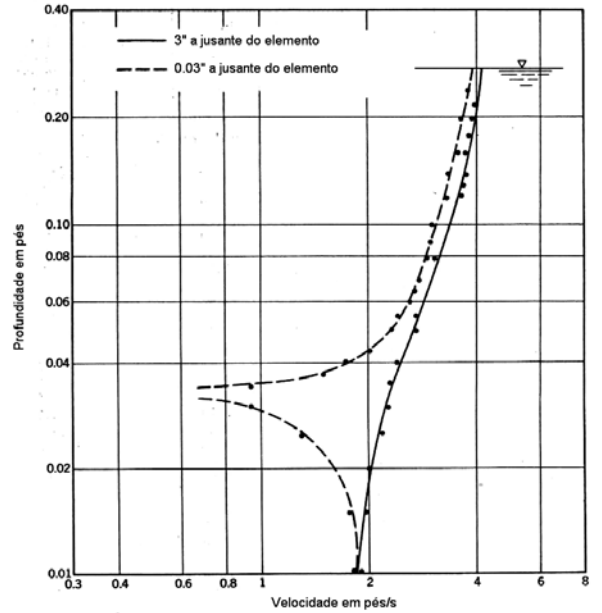


Fig. 3-6: Perfis de velocidades medidos por BIERY e DELLEUR (1961)

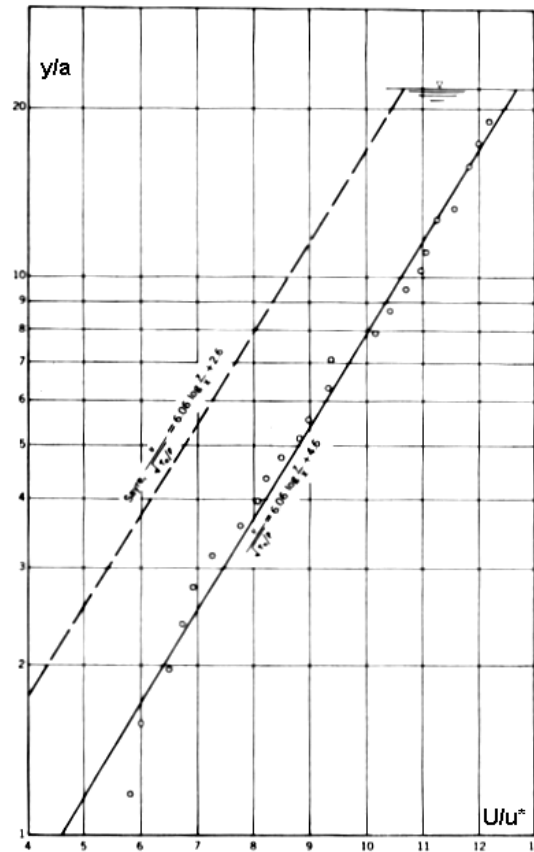


Fig. 3-7: Resultados de BIERY e DELLEUR (1961)

É interessante observar a boa aderência à lei logarítmica, considerada a deformação do perfil de velocidade proporcionado pelas barras, que tem efeito menor em termos de resistência ao escoamento do que os blocos espalhados.

BLENCH (1961), também contribuindo ao trabalho de SAYRE & ALBERTSON, sugere a correção dos resultados apresentados pela redução da profundidade y_n de um valor igual à altura dos blocos visando um melhor ajuste para os pontos experimentais. A correção assim proposta leva a uma modificação da equação Eq. 3-1, resulta:

$$\text{Eq. 3-4} \quad \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{U}{u_*} = 5.5 \log \frac{y_n - \Psi}{\Psi} + 1.4$$

Foi posteriormente demonstrado pelos autores SAYRE & ALBERTSON que, para a faixa de profundidades abrangida nos ensaios, a consideração do deslocamento a partir do fundo do canal levaria aos mesmos resultados apontados na Eq. 3-1.

Outra contribuição foi proposta por HARLEMAN e HAMMER JR (1961), através do emprego da fórmula da *Força de Arraste* sobre elementos isolados. Em sua conclusão os autores sugerem o emprego da expressão Eq. 3-5 onde C_b é o Coeficiente de Chezy relativo ao escoamento liso, N o número de elementos por unidade de área de fundo do canal, A é a área da seção transversal do bloco na direção do escoamento e C_D é o coeficiente de arraste determinado experimentalmente. Os valores encontrados para C_D , a partir dos dados de SAYRE & ALBERTSON estão indicados na tabela abaixo

$$\text{Eq. 3-5} \quad \left(\frac{\sqrt{g}}{C} \right)^2 = \left(\frac{\sqrt{g}}{C_b} \right)^2 + \frac{NC_D A}{2}$$

Tab. 3-2: Valores de C_D de Harleman e Rumer

A/Y_n	C_D
0.5	1.2
0.75	1.25

O tratamento da rugosidade de larga escala através do enfoque da força de arrastamento é interessante pois passa ao largo do problema da lei de distribuição de velocidades adotada, estando entretanto associado à forma geométrica dos elementos.

3.3 Experimentos de KNIGHT e MACDONALD

KNIGHT e MACDONALD (1978) desenvolveram uma análise comparativa entre as formulações propostas pelos pesquisadores Morris, Sayre e Albertson, Adachi e Ranga Raju, com a finalidade de ratificar as conclusões relativas ao comportamento da rugosidade de larga escala.

O estudo foi desenvolvido com experimentos em um canal de 15.25 x 0.46 x 0.38 m (L x B x H) e declividade fixa igual a 0.958×10^{-3} m/m. A rugosidade artificial empregada consistiu em tiras de material plástico de 3 mm² de seção transversal e 46 cm de comprimento. Foram efetuadas medições de velocidade e de nível d'água, em diferentes seções variando-se a vazão e o espaçamento das tiras entre 0.10m e 1,0m, ou seja, para as relações $3.57 \leq (E/a) \leq 333$. Os ensaios foram efetuados para condição de regime uniforme.

Os autores detalharam a classificação de turbulência desenvolvida por MORRIS(1971) incluindo duas categorias a mais: o escoamento não uniforme hiper-turbulento e o escoamento semi-quase-liso. A Fig. 3-8 a seguir ilustra esta classificação.

Tab. 3-3 Classificação do Escoamento Segundo Knight e MacDonald (1978)

E/a	Padrão de Escoamento
∞	Liso
13.9 a 333	Turbulento Semi-Liso
10.4	Hiper-turbulento não uniforme
6.95	Hiper-turbulento uniforme
5.21	Semi quase liso
3.47	Quase liso

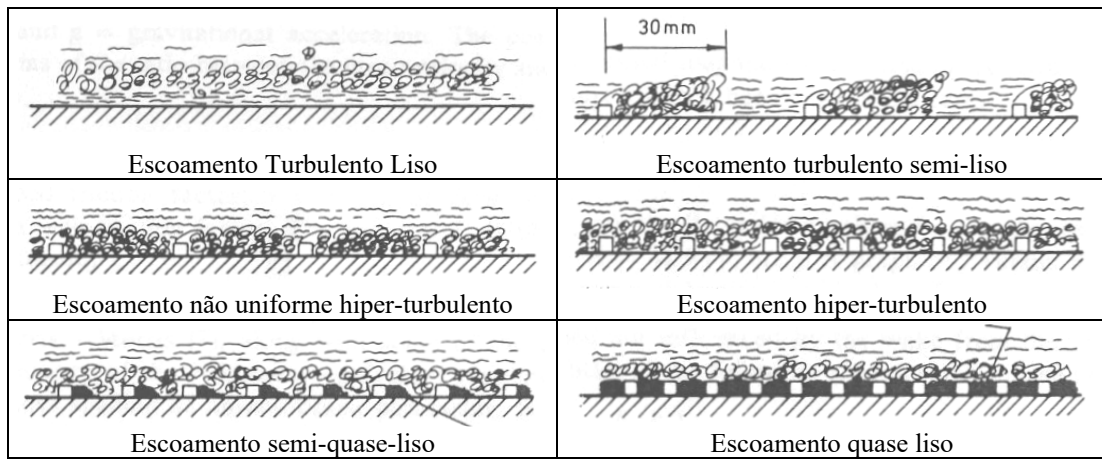


Fig. 3-8 Padrões de escoamento detalhados por Knight e MacDonald (1978)

Os autores inicialmente separaram os efeitos de rugosidade de fundo e de parede, realizando preliminarmente ensaios com o canal sem a macro-rugosidade de fundo e estabelecendo as seguintes relações para o fator de atrito:

Eq. 3-6
$$f_b = f + \frac{2h}{B}(f - f_w)$$

Eq. 3-7
$$\frac{R_w}{f_w} = \frac{R}{f}$$

onde f_b é o fator de atrito do fundo, f e R respectivamente o fator de atrito e número de Reynolds globais e f_w e R_w o mesmo referente às paredes. A relação R/f foi estimada inicialmente a partir dos ensaios com o canal ‘liso’, isto é, sem a macro-rugosidade.

ADACHI (Apud Knight e MacDonald, 1978) propôs uma relação para o fator de atrito dos escoamentos hiper-turbulentos e quase lisos derivada da equação logarítmica da velocidade. Para tal introduziu um fator k' naquela função e estabeleceu uma relação entre a altura da rugosidade a e k' . A equação resultante é:

$$\text{Eq. 3-8} \quad \frac{U}{u_*} = 0.25 + 19 \ln\left(\frac{E}{b}\right) + 5.75 \log\left(\frac{h}{k'}\right)$$

GARDE e RANGA RAJU (apud KNIGHT e MACDONALD, 1978), analisando escoamento em túneis e canais propuseram uma fórmula para a equação da resistência empregando o coeficiente de arrastamento C_D , para densidades de rugosidade $E/a \leq 40$. A equação de partida é semelhante ao perfil logarítmico:

$$\frac{1}{\sqrt{C_D}} = C_1 \log\left(\frac{h}{k}\right) + C_2$$

Admitindo que, para estas altas densidades de rugosidade, C_D possa ser correlacionado com f , a equação de resistência fica:

$$f_b = \frac{C_D}{E/a}$$

$$\text{Eq. 3-9} \quad \frac{U}{u_*} = \left(C_1 \sqrt{2} \sqrt{E/a} \right) \log\left(\frac{h}{k}\right) + \left(C_2 \sqrt{2} \sqrt{E/a} \right)$$

onde $0.7 \leq C_1 \leq 4.0$ e $-1.1 \leq C_2 \leq 0.1$.

A comparação dos diferentes métodos permitiu aos pesquisadores concluir que, apesar de pequenas diferenças, todos os dados ajustam-se bem a uma lei semi-logarítmica como a proposta por SAYRE E ALBERTSON. O fator de atrito f_b atinge um máximo ao redor de $E/a=8$ e $h/B=0.20$ (Fig. 3-9 e Fig. 3-10), para todos os modelos testados, com exceção do modelo de GARDE e RAJU. Os autores esboçam

ainda uma relação entre o parâmetro geométrico $\psi=(\chi/a)$ e o espaçamento E/a . Estas conclusões são evidenciadas nas curvas apresentadas nas figuras a seguir.

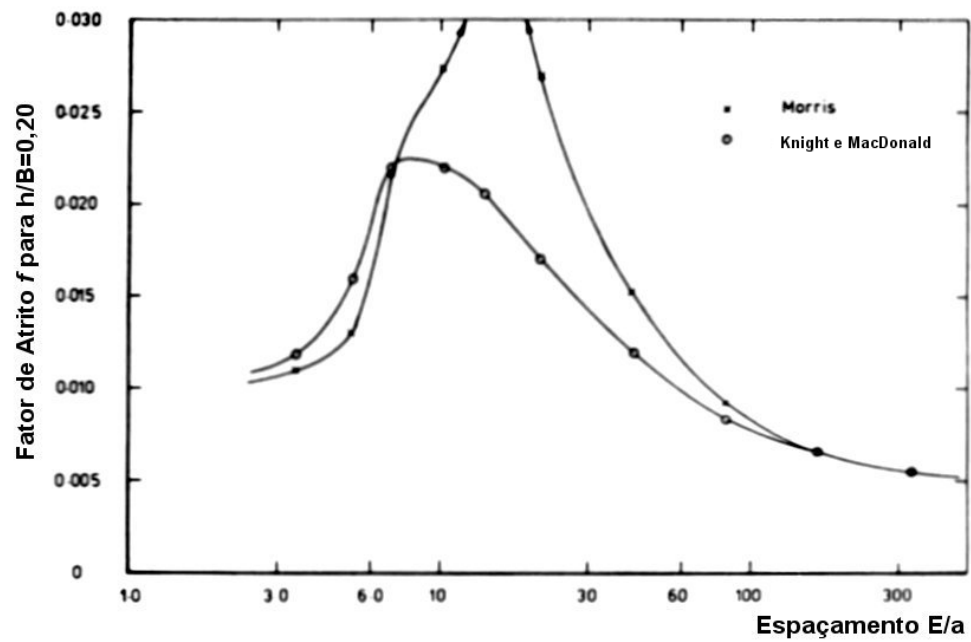


Fig. 3-9: Fator de atrito global f x E/a (KNIGHT e MACDONALD)

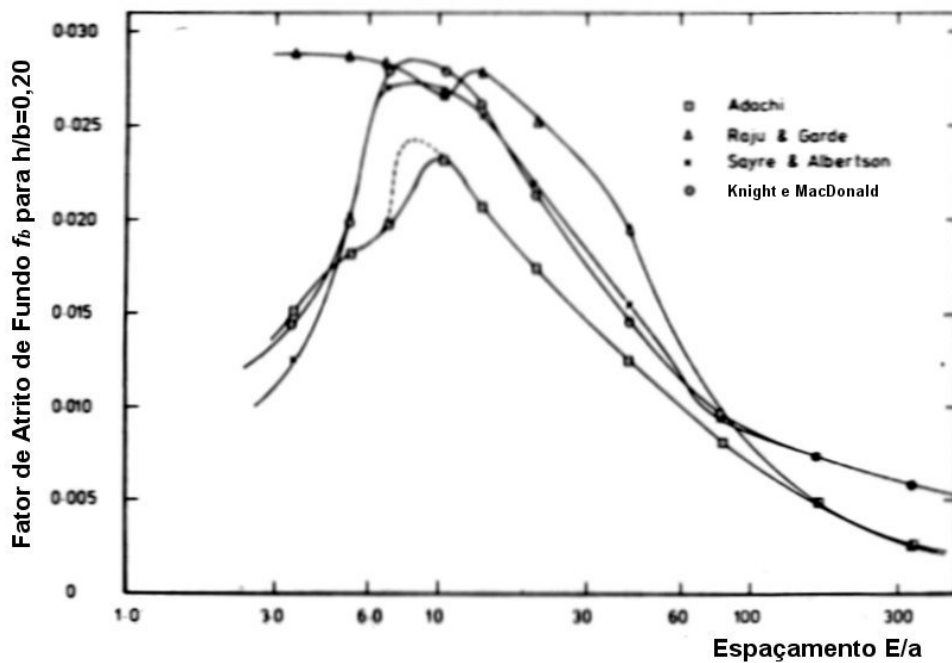


Fig. 3-10 : Fator de atrito de fundo f_b x E/a (KNIGHT e MACDONALD)

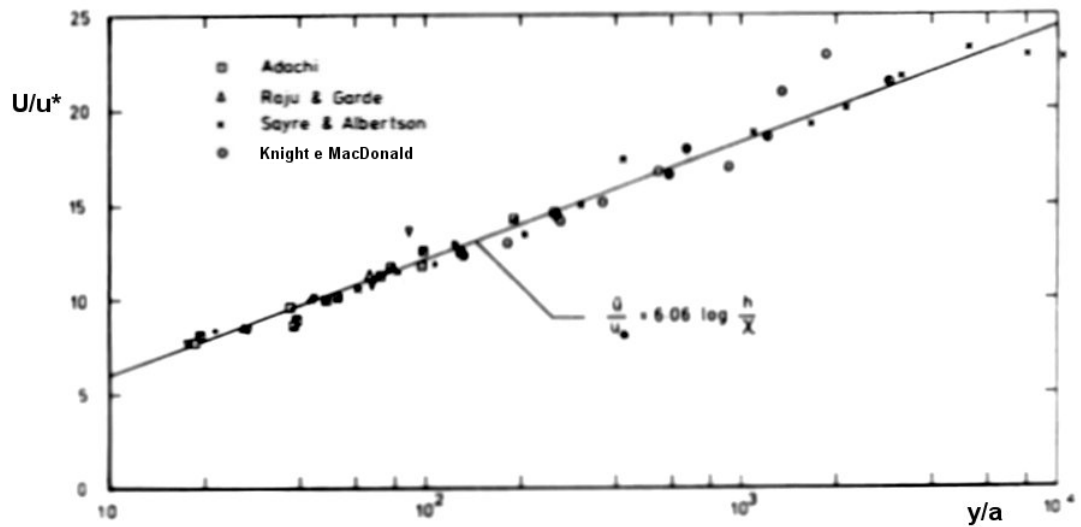


Fig. 3-11 : Tensões Tangenciais $U/u^* \times h/\psi$ (KNIGHT e MACDONALD)

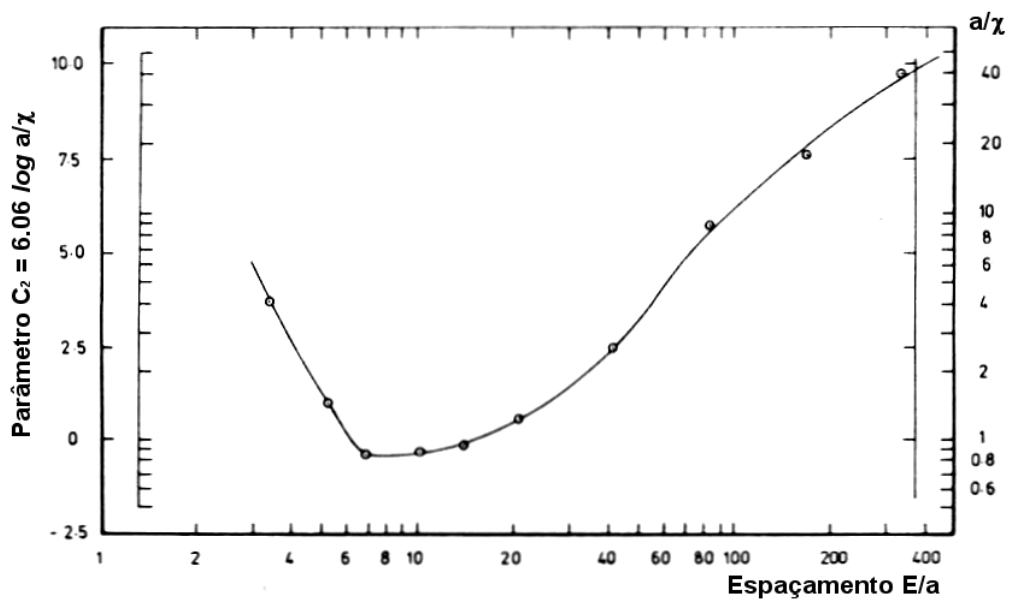


Fig. 3-12: Relação $\psi \times L/a$ (KNIGHT e MACDONALD)

Em trabalho publicado posteriormente, KNIGHT e MACDONALD analisaram as diferenças entre o fator de atrito devido ao fundo do canal e das paredes laterais, considerando o problema da rugosidade de larga escala. Através do mesmo modelo de canal já descrito, foram efetuadas medições de velocidade em duas profundidades para a mesma vertical, comparando-se os valores de velocidade de atrito junto ao fundo (tensão tangencial por unidade de massa específica) com a expressão proposta por SAYRE e ALBERTSON (1961).

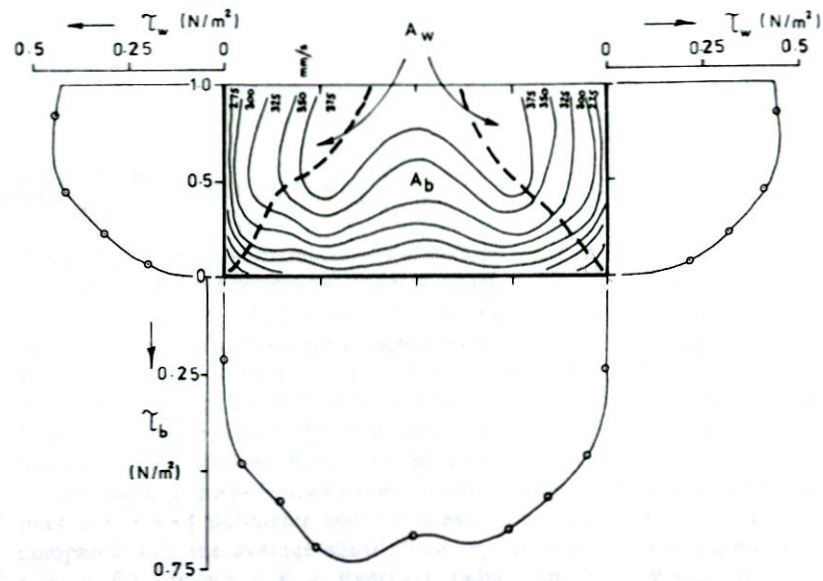


Fig. 3-13 Distribuição típica das tensões tangenciais junto ao fundo e paredes para um canal retangular (Knight e Macdonald, 1978)

Os autores concluíram que as tensões de atrito no fundo e nas paredes variam entre 0.2 e 1.2 em relação à média (Fig. 3-14), dependendo do arranjo de rugosidade aplicado. A parcela da tensão de atrito total devido às paredes e devido ao fundo varia com a profundidade, igualando-se quando a relação y/B está em torno de 0.42 (Fig. 3-15) .

A principal contribuição deste trabalho entretanto está na análise do efeito de parede, de forma a poder-se considerar o escoamento bidimensional no plano vertical. Os autores estudaram a relação entre a tensão tangencial no fundo (τ_b) e a tensão superficial para um canal bidimensional $\tau_{2D} = \gamma \cdot h \cdot S_f$ para diferentes profundidades de escoamento. Desta forma, o canal pode ser considerado bidimensional quando a relação τ_b/τ_{2D} está próxima de 1. A Fig. 3-16 permite observar que para valores da relação E/a inferiores a 20, o canal pode ser considerado plenamente bidimensional (ou de grande largura) quando B/h está em torno de 25. Admitindo-se $\tau_b/\tau_{2D} = 95\%$, o canal pode ser considerado bidimensional para B/h em torno de 10.

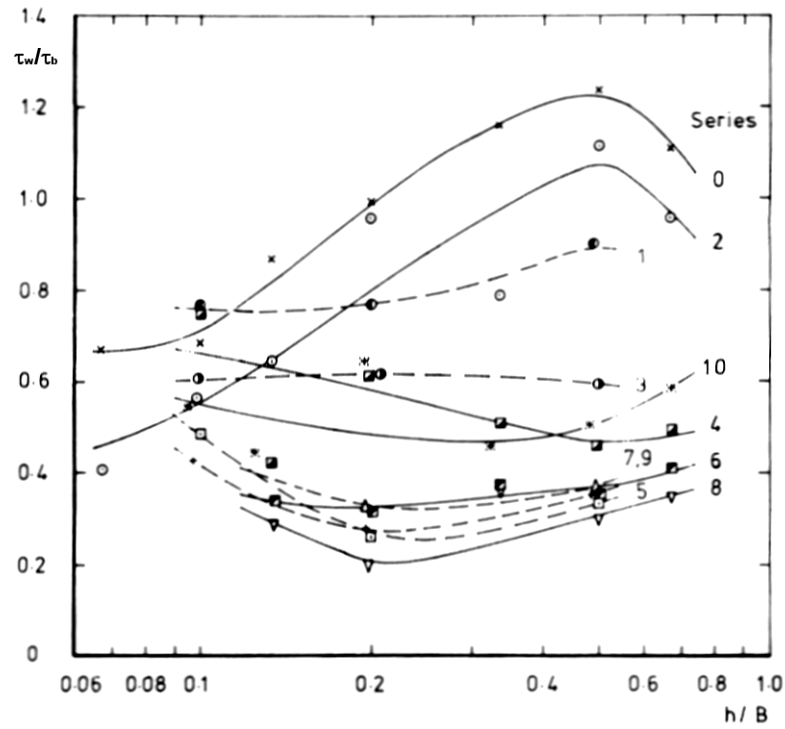


Fig. 3-14: Relações entre τ_b e τ_w para diferentes arranjos de rugosidade Fundo (Knight e Macdonald, 1978)

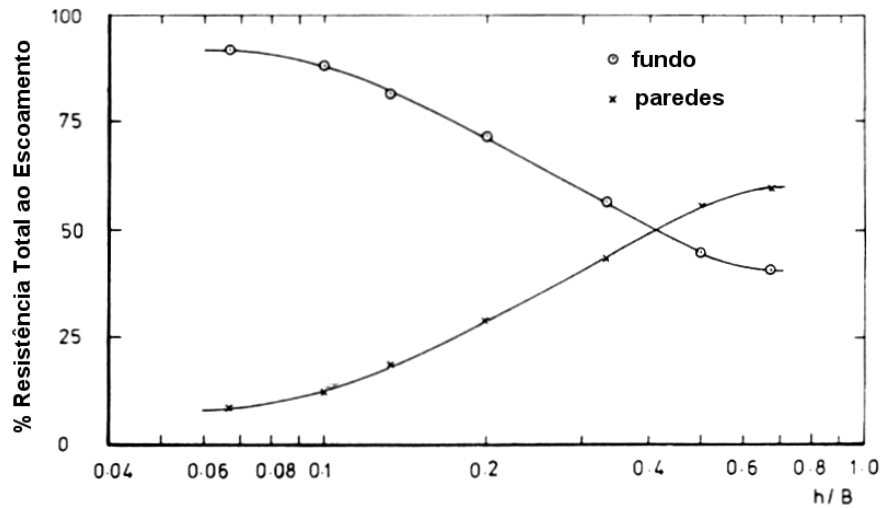


Fig. 3-15: Tensões tangenciais nas paredes e no fundo (Knight e Macdonald, 1978)

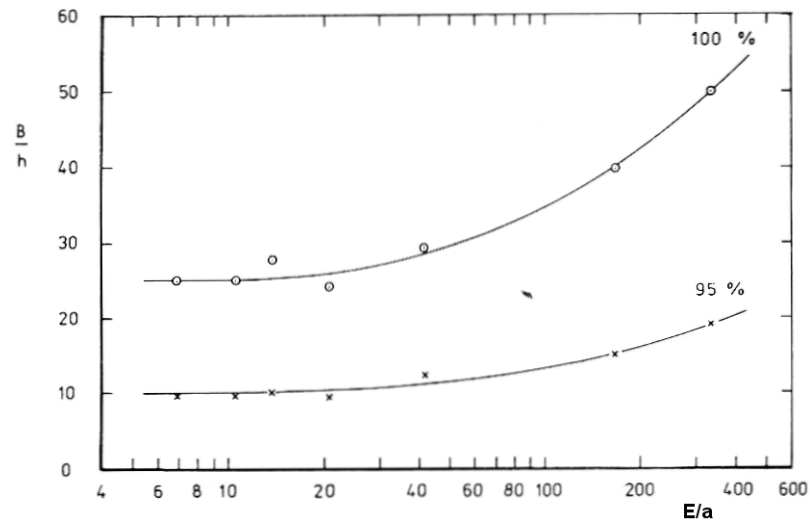


Fig. 3-16 Efeito da largura do canal e altura de rugosidade λ (Knight e Macdonald, 1978)

3.4 Estudos Específicos

3.4.1 Correlações de Shen e Li

SHEN e LI (1973), enaltecendo a importância dos trabalhos anteriormente apresentados, postularam a formulação de uma expressão geral para a determinação da resistência ao escoamento de obstáculos de fundo em canais que pudesse tomar em conta todos os fatores intervenientes. A expressão proposta tem a forma da equação Eq. 3-10, onde a, b, t e l são parâmetros geométricos ilustrados na Fig. 3-17, β_i são coeficiente de regressão e E representa os erros de regressão. Esta forma de análise, puramente matemática pode ser descrita como ‘modelo de hiper-correlação’.

$$\begin{aligned}
 \text{Eq. 3-10} \quad \frac{U}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = & \beta_0 + \beta_1 \ln\left(\frac{y_n}{a}\right) + \beta_2 \ln\left(\frac{t}{b}\right) + \beta_3 \ln\left(\frac{l}{b}\right) + \\
 & + \beta_4 \ln\left(\frac{c}{b}\right) + \beta_5 \ln\left(\frac{a}{b}\right) + \ln E
 \end{aligned}$$

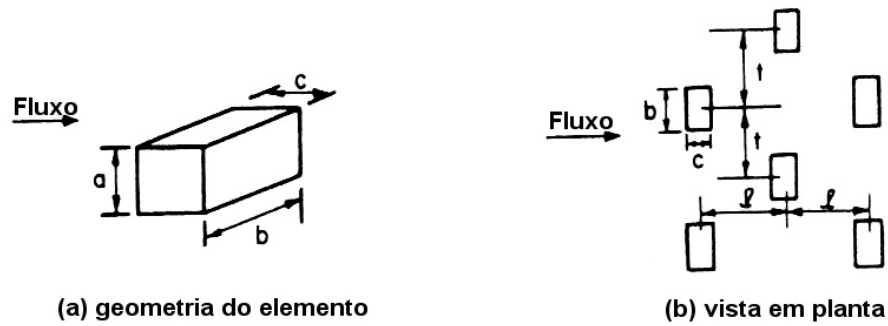


Fig. 3-17: Parâmetros Geométricos de Shen e LI

Os autores consideraram os mesmos dados de SAYRE & ALBERTSON, KOLOSEUS e DAVIDIAN e U.S CORPS of ENGINEERS (apud SHEN e LI, 1973) para obtenção dos coeficientes, concluindo pela melhor correlação entre os parâmetros (y_n/a), (t/b) e (l/b) a partir de testes de aderência.

$$\text{Eq. 3-11} \quad \frac{U}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = -0.0229 + 2.917 \ln\left(\frac{y_n}{a}\right) + 1.871 \ln\left(\frac{t}{b}\right) + 1.229 \ln\left(\frac{l}{b}\right)$$

Seguindo a mesma linha de análise de Sayre e Albertson, os autores definiram o parâmetro Ω para caracterizar as variantes geométricas dos obstáculos de fundo e Δ a relação y_n/a , re-escrevendo a relação Eq. 3-11 em função dos novos parâmetros.

$$\text{Eq. 3-12} \quad \frac{U}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 2.917 \ln\left(\frac{\Delta}{\Omega}\right)$$

$$\text{Eq. 3-13} \quad \Omega = 1.008 \left(\frac{t}{b}\right)^{-0.641} \left(\frac{l}{b}\right)^{-0.421}$$

$$\Delta = \frac{y_n}{a}$$

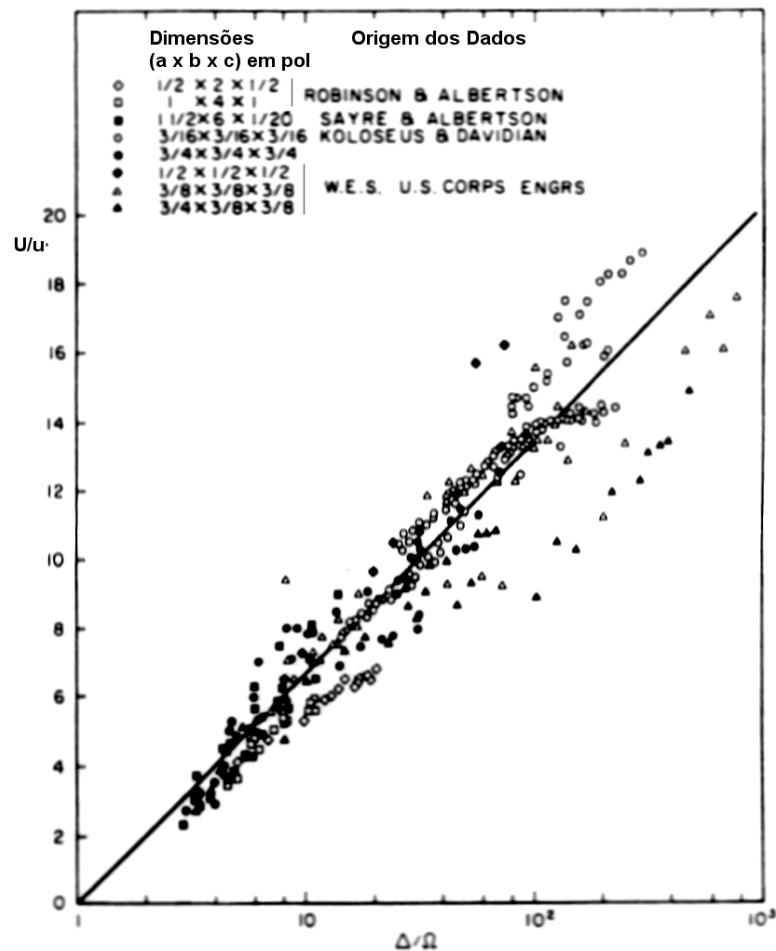


Fig. 3-18: Dados experimentais e correlação de SHEN e LI (1973).

A Fig. 3-18 mostra os dados experimentais utilizados por SHEN e LI e a correlação obtida. Nota-se que a correlação não é muito boa na faixa onde (Δ/Ω) situa-se acima de 30, para a qual os valores de (U/u^*) apresentam grande variação.

3.4.2 Blocos Naturais

BATHURST (1978), enfocou o problema da resistência ao escoamento devido à rugosidade de larga escala constituída de grandes blocos naturais, comum em rios de montanha, denominados *boulders*. O trabalho merece referência em função de sua metodologia de abordagem, embora este texto não investiga a análise teórica original. O autor propõe equacionar a resistência através do método proposto por

JUDD e PETERSON (apud BATHUSRT, 1978), que relaciona a tensão tangencial com uma função que depende da geometria do escoamento e dos blocos. Na Eq. 3-14, d é a profundidade, w a largura superficial da seção e D_{50} o diâmetro característico correspondente a 50% na curva granulométrica do material.

$$\text{Eq. 3-14} \quad \sqrt{\frac{g}{f}} = \frac{U}{(gdS_f)^{1/2}} = f(\lambda) \left(\frac{d}{w}\right)^{7(\lambda-0.08)} \left(\frac{d}{D_{50}}\right)^{1/3}$$

O parâmetro λ representa uma relação entre o tamanho, a forma o espaçamento e a distribuição granulométrica dos blocos naturais e as dimensões da seção do canal, podendo ser definido de uma das formas abaixo:

$$\text{Eq. 3-15} \quad \lambda_1 = \frac{\sum_1^n A_F}{A_{bed}} \quad \text{e} \quad \lambda_2 = \frac{\sum_1^n A_B}{A_{bed}}$$

Para ajuste da Eq. 3-14 o autor utiliza o método da força de arrastamento. A tensão tangencial é definida como resultado do somatório da força de arrastamento sobre n blocos isolados sobre uma superfície do leito A_{bed} , com área frontal ao escoamento A_F e coeficiente de arrastamento C_D , sendo u a velocidade frontal incidente sobre cada bloco.

$$\text{Eq. 3-16} \quad \tau = \frac{\sum_1^n D_F}{A_{bed}} = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 \frac{\sum_1^n A_F}{A_{bed}}$$

A hipótese admitida considera a homogeneidade longitudinal da distribuição de blocos, o que nem sempre ocorre na prática. Para obtenção de uma correlação, prática os autores correlacionaram λ_1 e λ_2 com dados granulométricos e geométricos

de 3 seções do Rio Tees, na Inglaterra, colhidos por HR Wallingford. As relações acima definidas resultaram nas Eq. 3-17.

$$\text{Eq. 3-17} \quad \lambda_1 = 0.139 \log\left(\frac{1.91D_{84}}{R}\right)$$

$$\lambda_2 = 0.360 \log\left(\frac{1.52D_{84}}{R}\right)$$

O fator de atrito f , em termos da força de arrastamento pode ser escrito na forma da Eq. 3-18, onde a relação (u/U) deve ser admitida igual a unidade para um escoamento próximo do ‘ideal’ e i representa uma das definições para a lei de distribuição dos blocos.

$$\text{Eq. 3-18} \quad \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{(gdS_f)^{1/2}} = \left[\frac{1}{\frac{1}{2}C_D\lambda_i\left(\frac{u}{U}\right)^2} \right]$$

As equações resultantes do ajuste (Eq. 3-19) aos dados de campo, embora não universais, apresentam *boa correlação* quando aplicadas aos dados de outras origens que não a da pesquisa, indicando ser esta uma boa forma de interpretação dos efeitos da resistência ao escoamento. Algumas dificuldades da aplicação do método podem ser previstas, como por exemplo, a classificação granulométrica de grandes blocos naturais de pedra num leito de rio. Por outro lado, o emprego de blocos naturais lançados em fundo de rio é uma idéia interessante para estabilização e regularização de cursos d’água, como é o objetivo deste trabalho.

$$\text{Eq. 3-19} \quad \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{(gRS_f)^{1/2}} = \left(\frac{R}{0.365D_{84}}\right)^{2.34} \left(\frac{d}{w}\right)^{7(\lambda_1-0.08)}$$

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{(gRS_f)^{1/2}} = \left(\frac{R}{0.748D_{84}}\right)^{5.83} \left(\frac{d}{w}\right)^{7(\lambda_2-0.08)}$$

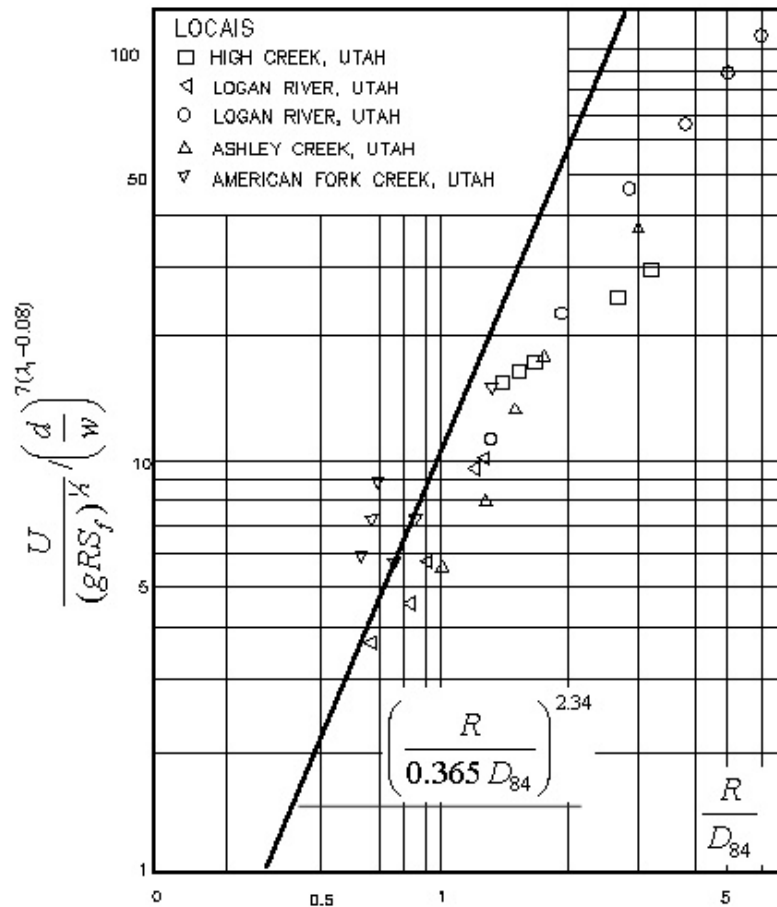


Fig. 3-19: Comparação da Eq. 3-19 (BATHURST, 1978) e dados de outros pesquisadores

3.4.3 Modelo de Aguirre, Fuentes e Olivero

Os especialistas AGUIRRE, FUENTES e OLIVERO (1997) propuseram uma formulação para cálculo da resistência ao escoamento proporcionada por macro-rugosidade constituída de blocos de geometria regular, gravas ou seixos rolados, considerando uma altura y_1 a partir do fundo, sob a qual existe a formação de uma esteira de vórtices sobre os elementos macro-rugosos. Este conceito é semelhante ao de escoamento quase-liso de MORRIS e WIGGERT (1973).

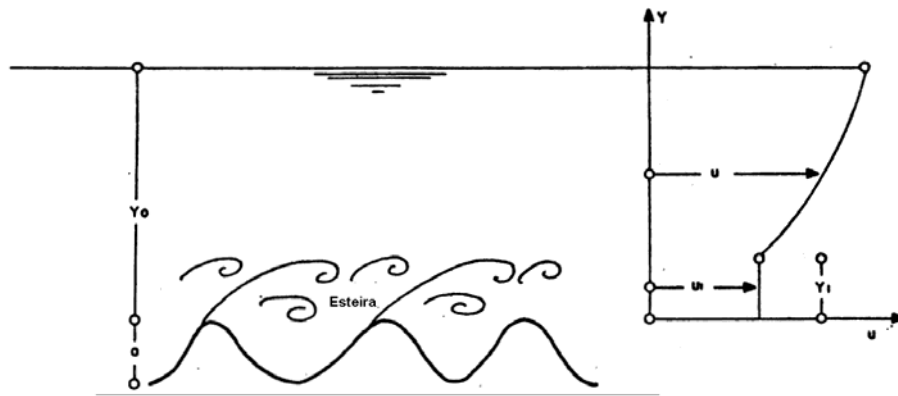


Fig. 3-20: Esteira de vórtices sobre o fundo com macro-rugosidades e perfil de velocidades proposto (AGUIRRE, FUENTES e OLIVERO, 1997)

Considerou-se a hipótese de que a velocidade abaixo desta camada y_1 permanece constante, derivando-se a partir daí uma equação para o coeficiente de Chezy adimensional (C^*), dada pela soma da equação da lei logarítmica sem o efeito da macro-rugosidade acrescida de um termo adicional.

Este termo considera a espessura y_1 proporcional à altura a da macro-rugosidade através da introdução de um coeficiente de proporcionalidade β determinado experimentalmente. A Eq. 3-20 traduz o modelo proposto sendo a parcela C_{*0} representada pela lei logarítmica com o coeficiente $B=8.5$. Os demais coeficientes foram ajustados para diferentes geometrias e densidade de blocos, conforme indica a Tab. 3-4.

Eq. 3-20
$$\frac{U}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} = C_* = C_{*0} + \left(\frac{\beta}{k}\right)\left(\frac{a}{y_n}\right)$$

$$C_{*0} = \frac{1}{k} \log\left(\frac{y_n}{\alpha \cdot a}\right) + B - \frac{1}{k}$$

Tab. 3-4: Valores dos Coeficientes do Modelo de AGUIRRE, FUENTES e OLIVERO (1997)

Autor	Larg. Canal (cm)	Tipo	Densidade Superficial	Magnitude	Dimensão (mm)	alfa	Beta
AGUIRRE	50	cubos de lado paralelos a corrente	0.16	a	50	3.2	2.00
AGUIRRE	50	cubos de lado a 45° com a corrente	0.16	a	50	6.0	1.68
BAYAZIT	25	hemisférios de diâmetro d	máx	d/2	11.5	3.0	0.16
AGUIRRE	100	Seixos rolados - uma camada - dimensão vertical dz	máx	dz	64	1.0	0.80
OLIVERO	10	gravas - varias camadas	máx	D ₉₀	10-23	2.5	3.00
KHAMPIUS	38	areias e gravas	máx	d ₉₀	05-46	2.0	0.00

O modelo de AGUIRRE et alli na verdade representa um ajuste de dados a teoria de MORRIS e WIGGERT (1973). Esta correlação tem boa aderência para rugosidade composta de elementos de geometria regular (cubos e hemisférios), porém grande dispersão para elementos naturais (blocos de pedra e areia), como indicam as figuras abaixo.

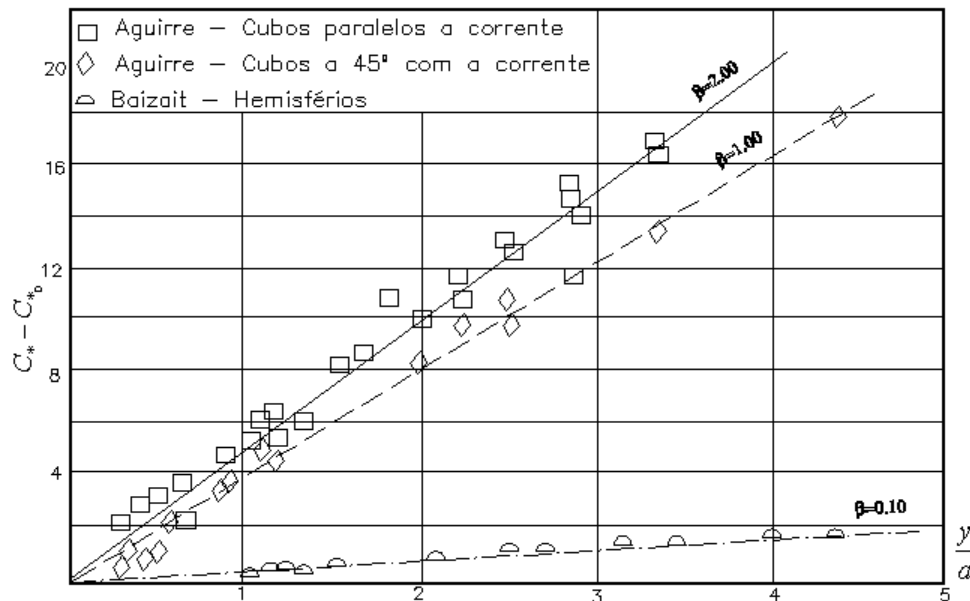


Fig. 3-21: Dados experimentais e equações ajustadas de Aguirre et Alli para elementos de geometria regular(1997)

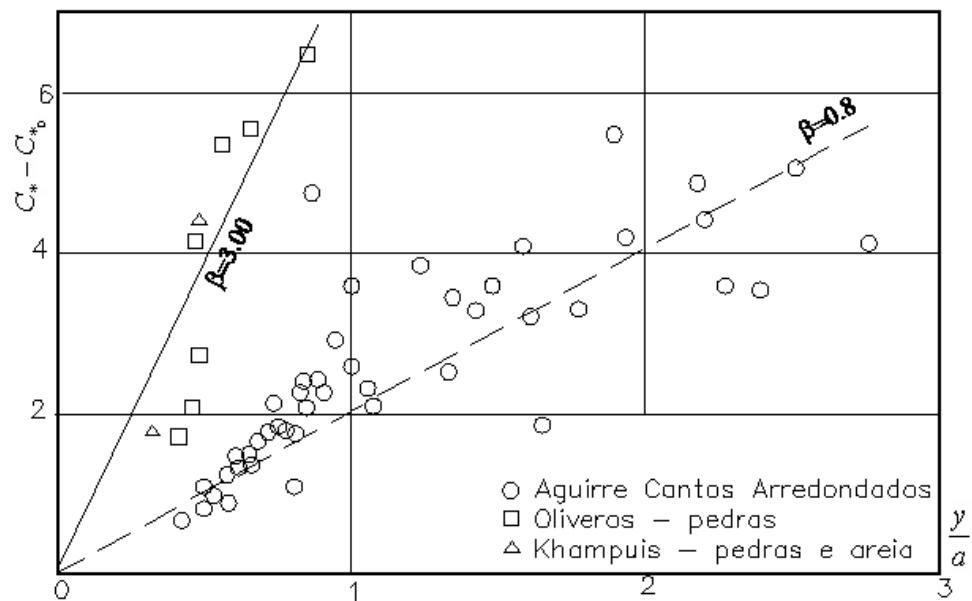


Fig. 3-22: Dados experimentais e equações ajustadas de Aguirre et Alli (1997)

3.4.4 Estudos da Hidrovia do Araguaia

BRIGHETTI et Alli (2001) desenvolveram estudos para implantação de travessões de fundo, destinados à regularização de passagens críticas para a navegação na Hidrovia do Araguaia. Os estudos foram desenvolvidos em modelo reduzido, escala 1:40, tendo o canal 2,00m da largura e declividades de fundo 0,1%, 0,07% e 0,04%. Foram pesquisados obstáculos de seção transversal retangular de dimensões $a \times t \times E$ (altura \times comprimento \times espaçamento) variáveis, num total de 152 ensaios, todos em regime uniforme. Os dados experimentais estão apresentados no APÊNDICE A. Os autores verificaram a influência do espaçamento na resistência ao escoamento, concluindo que a relação $a/E = 8$ apresenta maior impacto no parâmetro U/u^* , conforme ilustra a Fig. 3-23. Foi verificada também certa influência da declividade na resistência ao escoamento, onde para menores inclinações de fundo registrou-se menor resistência (Fig. 3-24). Da mesma forma, obstáculos com relação (a:t) mais próxima de 1:1 também apresentam maior resistência ao escoamento.

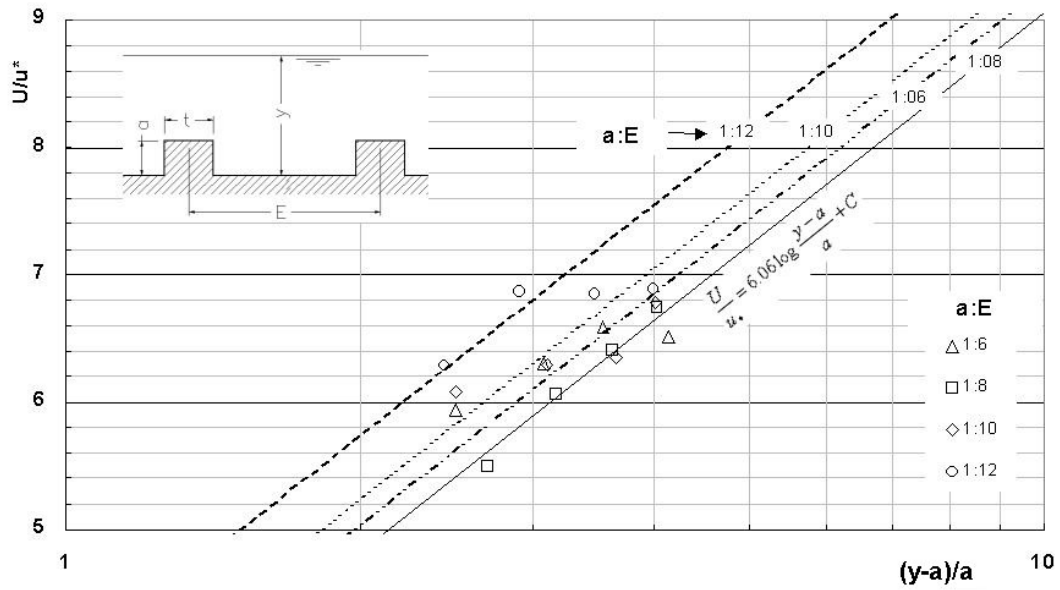


Fig. 3-23: Efeito do espaçamento dos obstáculos e comparação com ajuste a Eq. 3-1 (BRIGHETTI et alli, 2001) (declividade de fundo 0,1%)

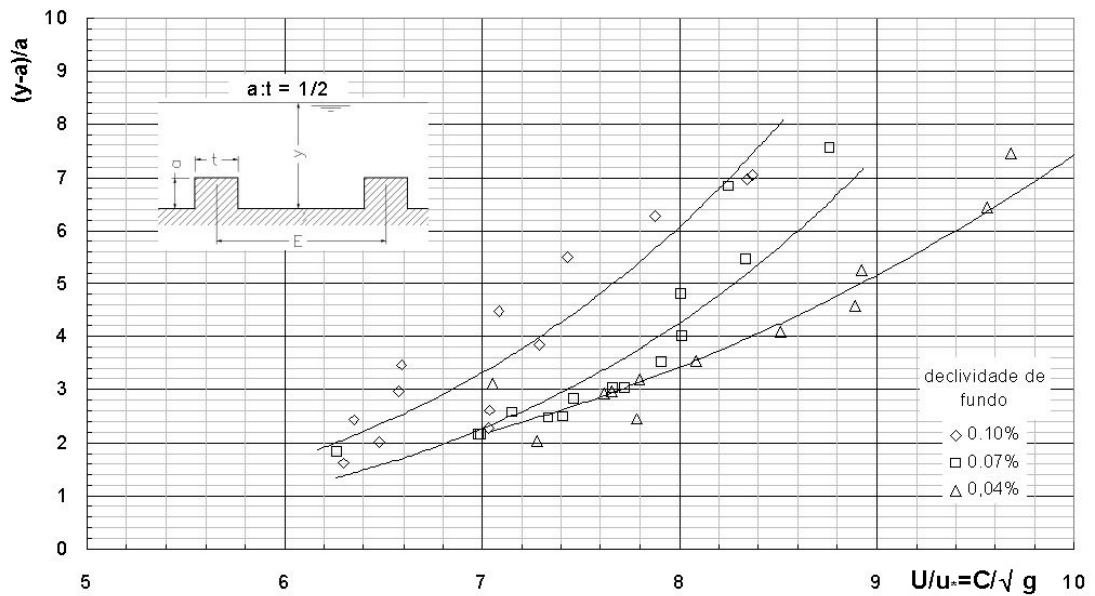


Fig. 3-24: Efeito da declividade de fundo detectado por BRIGHETTI et alli (2001), para a relação $a:t = 1:2$

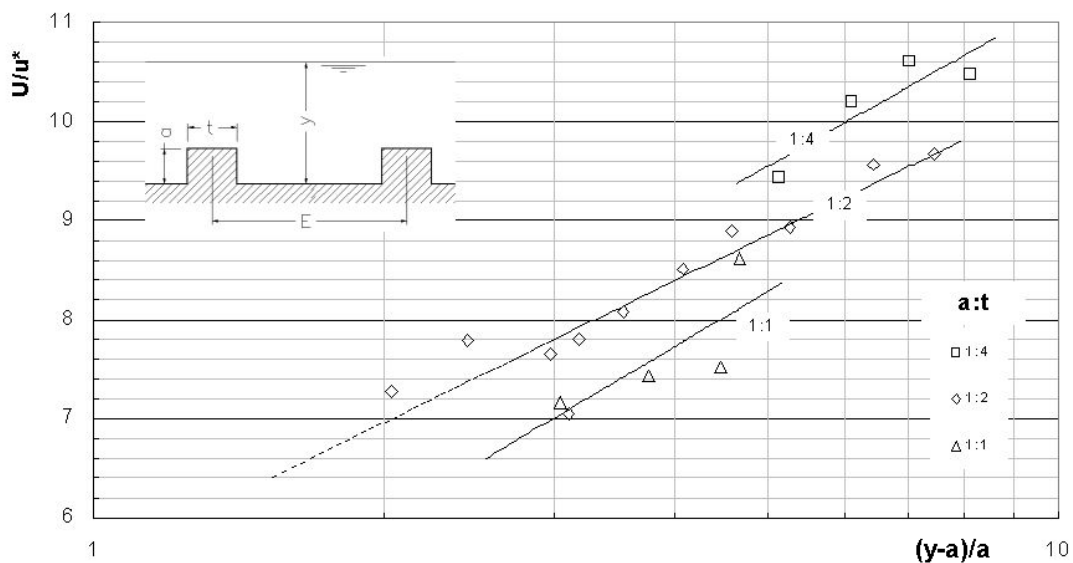


Fig. 3-25: Efeito da relação $a:t$ para declividade de fundo igual a 0.04% (BRIGHETTI et alli,2001).

4 ESTUDO EXPERIMENTAL DA MACRO-RUGOSIDADE DE FUNDO

4.1 Introdução

Para a caracterização dos efeitos da macro-rugosidade composta por travessões de seção retangular aplicados ao fundo dos canais, desenvolveu-se um estudo apoiado em modelação física e matemática, visando a interpretação do fenômeno e o estabelecimento de leis que possibilitem sua aplicação em obras de engenharia hidráulica.

O estudo em modelo físico teve por objetivo a determinação da relação U/u^* para um canal de laboratório, no qual foram aplicados elementos de fundo com diferentes arranjos geométricos. Para tanto se empregou o *método global*, já anteriormente citado, determinando-se as tensões tangenciais a partir das condições do escoamento. O processo consiste na medição direta de vazões e profundidades e no cálculo do parâmetro de resistência através de um modelo matemático de escoamento em canais, desenvolvido pelo autor e apresentado em SOUZA, MARTINS & FADIGA (1990).

O modelo matemático pode considerar diferentes formulações de tratamento das perdas de energia e desta forma determinar, para cada formulação e cada condição física ensaiada, os parâmetros referentes a estas leis.

O estudo experimental proposto dá prosseguimento aos trabalhos já desenvolvidos por BRIGHETTI et alli (2001), quando do desenvolvimento dos trabalhos para a Hidrovia do Araguaia.

4.2 O Modelo Matemático para Análise das Perdas de Energia

O modelo proposto resolve as equações de Saint-Venant reduzidas para escoamento permanente gradualmente variado (Eq. 2-64), a partir de um algoritmo implícito centrado no espaço, desenvolvido originalmente pelo autor e apresentado em SOUZA (1991) e TUCCI (1995). O algoritmo introduz as seguintes discretizações nos termos da Eq. 2-71, onde F é o número de Froude do escoamento (Eq. 4-3) e ϕ o coeficiente de implicidade espacial.

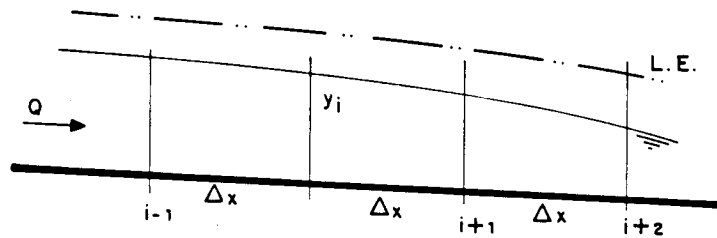


Fig. 4-1: Esquema de discretização do modelo proposto

$$\text{Eq. 4-1} \quad 2\beta \frac{Q}{A} q + gA(1 - \beta F_r^2) \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f = 0$$

$$\text{Eq. 4-2} \quad \begin{aligned} \frac{\partial \beta}{\partial x} &= \frac{\beta_{i+1} - \beta_i}{\Delta x} & \frac{\partial y}{\partial x} &= \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \\ \bar{\beta} &= \phi \beta_{i+1} + (1 - \phi) \beta_i & \bar{A} &= \phi A_{i+1} + (1 - \phi) A_i \\ \bar{F} &= \phi F_{i+1} + (1 - \phi) F_i & \bar{S}_f &= \phi S_{f_{i+1}} + (1 - \phi) S_{f_i} \end{aligned}$$

$$\text{Eq. 4-3} \quad F^2 = \frac{Q^2 B}{gA^3}$$

O parâmetro S_f , gradiente da linha de energia L.E., pode ser estimado através de diferentes modelos como exposto no item subsequente.

Substituindo os termos das Eq. 4-2 na Eq. 4-1, obtém-se uma equação da forma:

$$\text{Eq. 4-4} \quad D_i y_{i+1} + B_i y_i = E_i$$

onde

$$\text{Eq. 4-5} \quad D_i = g \frac{A_i}{\Delta x} (1 - F_i)$$

$$B_i = -D_i$$

$$E_i = q_i v_i - 2 \frac{\bar{\beta}_i \bar{Q}_i q_i}{\bar{A}_i} - g \bar{A}_i \bar{S}_f - \frac{\bar{Q}_i^2}{\bar{A}_i} \left(\frac{\bar{\beta}_{i+1} + \bar{\beta}_i}{\Delta x} \right)$$

4.2.1 Algoritmo de Solução

A Eq. 4-4, quando aplicada a um conjunto de n seções dá origem a um sistema de $(n-1)$ equações a n incógnitas em y . Admitindo-se uma condição de extremidade na primeira ou na última seção, obtém-se a solução do conjunto.

Para a obtenção dos valores de y a cada seção, adota-se um sentido de cálculo e procedendo-se à determinação dos coeficientes B_i , D_i , e E_i . O cálculo pode ser efetuado pelas relações de recorrência das Eq. 4-6.

$$\text{Eq. 4-6} \quad y_i = \frac{E_i - D_i y_{i+1}}{B_i}$$

$$y_{i+1} = \frac{E_i - B_i y_i}{D_i}$$

Como em geral o termo S_f depende de y , a solução final é obtida por iterações, admitindo-se um valor estimativo inicial para y_i ou y_{i+1} , resolvendo-se o sistema formado pelas Eq. 4-6 e reiterando-se a solução até que os valores de y_i ou y_{i+1} venham a atingir a precisão desejada.

4.2.2 Modelação das Perdas de Energia

O termo que considera as perdas de energia tem a forma genérica indicada na Eq. 4-7, onde u_* representa a velocidade de atrito, que pode ser expressa na forma dos diferentes modelos propostos no Capítulo 2, e resumidos na tabela Tab. 4-1.

$$\text{Eq. 4-7} \quad S_f = \frac{u_*^2}{gR_h}$$

Tab. 4-1: Modelos de Perda de Carga adotados e parâmetros intervenientes

Modelo	Equações	Parâmetros a determinar
Manning	$\frac{U}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{R_h^{3/8}}{n\sqrt{g}}$	Número de Manning n genérico
Lei Logarítmica Liso-Transição-Rugoso	$\frac{U}{u_*} = \frac{\sqrt{8}}{f}$ $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log\left(\frac{\text{Re}\sqrt{f}}{2.51} + \frac{14.8 \cdot R_h}{k_s}\right)$	Rugosidade Equivalente de parede k_s
Lei Logarítmica para escoamentos rugosos	$\frac{U}{u_*} = \frac{\sqrt{8}}{f} = \log\left(\frac{y}{\psi}\right)$	Parâmetro de macro-rugosidade ψ , associado à geometria, altura e espaçamento dos travessões.
Lei de distribuição probabilística de CHIU	$\frac{U}{u_*} = F(M) \frac{u_* D}{\nu}$ $F(M) = \frac{Me^M - e^M + 1}{(e^M - 1)^2}$	Parâmetro de entropia M , associado à uniformidade da distribuição de probabilidade das velocidades.

A lei de Manning está incluída nesta análise por uma questão de tradição, uma vez que a prática corrente da engenharia tem relações bem estabelecidas entre o fator n e os diferentes materiais utilizados nos revestimentos das canalizações.

A lei logarítmica que engloba o escoamento hidraulicamente liso, a transição e o rugoso, tem interesse particular na análise das condições originais do canal experimental, isto é, sem a aplicação da macro-rugosidade. A lei logarítmica para escoamento rugoso e a lei de CHIU são os objetivos principais desta pesquisa.

A solução do problema consiste na determinação do parâmetro de cada modelo sugerido na Tab. 4-1, a partir da linha d'água no canal e as demais condições de contorno, como vazão, declividade de fundo e geometria da seção.

Em outras palavras, busca-se determinar o parâmetro do modelo de perda de carga correspondente a uma configuração de macro-rugosidade no canal qualquer, de forma a produzir a melhor aderência da linha d'água calculada através das Eq. 4-6.

Para este objetivo o modelo incorpora uma técnica de otimização não linear, através do algoritmo GRG2 – Generalized Reduced Gradient, disponível na biblioteca *Solver* (www.frontsys.com, 2001). Esta técnica consiste na definição de uma *função-objetivo* a ser minimizada ou maximizada, constituída de variáveis do modelo e restrições impostas a estas variáveis.

No caso específico da solução do escoamento em canal, o problema pode ser colocado na forma de um modelo muito simples:

$$\text{Eq. 4-8} \quad \text{Min} \cdot F(Y_i) = \sum [Y_i - R(Y_{i+1}, p)]^2$$

$$\text{Sujeito a } Y_i > 0$$

onde função $F(y_i)$ representa o somatório dos desvios quadráticos entre profundidade observada e a calculada através da função R , que tem como variáveis a profundidade na seção $i+1$ e o parâmetro de perda de carga p . As equações de restrição do problema limitam-se a estabelecer profundidades y_i positivas. A função R pode ser definida como uma das Eq. 4-6.

O método de solução consiste na transformação do problema em uma matriz contendo a estimativa das derivadas parciais de cada parâmetro da função objetivo, os gradientes. A matriz assim composta é denominada de matriz Jacobiana, e não é constante, uma vez que o problema é fortemente Não Linear. Desta forma, a solução tem que ser obtida por iterações sucessivas.

A qualidade do resultado obtido pode ser avaliada através do índice de correlação de Pearson, calculado entre as profundidades calculadas e observadas, que pode ser expresso conforme a Eq. 4-9, na qual y e y' são respectivamente os valores observados e calculados para a profundidade y . A correlação de Pearson assim definida é adimensional, resultando entre $-1 \leq r \leq 1$.

$$\text{Eq. 4-9} \quad r = \frac{n \sum y_i y'_i - \sum y_i \sum y'_i}{\sqrt{[n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2][n \sum y'^2_i - (\sum y'_i)^2]}}$$

4.2.3 Correção dos Efeitos de Parede

Considerando que o canal não é suficientemente largo, em função do apontado na Fig. 3-13, torna-se necessária a introdução de uma correção dos efeitos de parede, de forma a permitir que os resultados de resistência ao escoamento sejam comparáveis aos obtidos em pesquisas semelhantes, que consideram a distribuição de velocidades totalmente bidimensional. A correção proposta é semelhante à utilizada por KNIGHT e MACDONALD (1978) e leva em conta a composição das perdas de energia através de duas parcelas, uma relativa ao fundo (b) e outra relativa às paredes (w).

$$\text{Eq. 4-10} \quad \frac{\tau_{0g}}{\rho} p_g = \frac{\tau_{0w}}{\rho} p_w + \frac{\tau_{0b}}{\rho} p_b = g A S_f$$

Na equação acima, as tensões tangenciais foram compostas pela soma dos efeitos de parede e fundo, sendo que o índice g se refere à seção global, w refere-se às paredes e b ao fundo. O termo p_g refere-se ao perímetro molhado total da seção: $p_g = p_w + p_b$.

O fator de atrito f_g resulta então numa composição linear do tipo:

Eq. 4-11
$$f_g = \frac{f_w P_w + f_b P_b}{P_g}$$

4.3 O Modelo Físico

4.3.1 Descrição da Bancada Experimental

Os ensaios para a verificação experimental dos efeitos da macro-rugosidade foram desenvolvidos no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. A montagem experimental, em circuito fechado, é constituída por um canal de 11m de comprimento de comprimento útil, seção transversal retangular com dimensões 0,50 x 0,45 m, reservatório com capacidade para 4,2 m³, sistema de recalque com capacidade para 240 m³/h.

A medição de vazão é feita através de um sensor tipo eletromagnético, com resolução de leitura de 1 m³/h, correspondente a um erro máximo relativo de 6,6% para a menor vazão de ensaio (15 m³/h) a 0,5% para a maior vazão utilizada (200 m³/h). O canal é dotado de um dispositivo que permite variar sua inclinação de fundo desde 0 até 2,1% , sendo o erro estimado na determinação da declividade de 0,00045%.

As paredes laterais do canal são de vidro laminado, em painéis de 1,90 m, com juntas verticais vedadas com borracha moldável à base de *silicone*. O fundo é constituído de chapa de alumínio polido, sendo a junta de contato *vidro-alumínio* também preenchida com borracha de silicone.

O controle *grosseiro* do nível d'água no canal pode ser feito através de dois transdutores de pressão, instalados próximos à extremidade de montante e jusante, com precisão de leitura de ± 1 mm. A medição *precisa* da linha d'água, para os fins desta pesquisa, pode ser efetuada através de cinco pontas limnimétricas dispostas em

suportes montados sobre as paredes do canal, com resolução de leitura de 0,05mm. O espaçamento longitudinal entre as pontas de medição é de 2m.

Desta forma, a precisão relativa da leitura de nível varia na faixa de 0,071% (menor profundidade) até 0,012% (maior profundidade)

A regulagem de vazão é feita através de duas válvulas, sendo uma do tipo *borboleta* para a regulagem grosseira e outra do tipo *gaveta* para a regulagem fina. Para garantir boas condições de escoamento na entrada do canal, foram posicionados elementos *tranqüilizadores* constituídos de telas de madeira em duas profundidades. O controle do nível na extremidade de jusante é efetuado através de uma comporta basculante vertical.

Para a simulação dos travessões de fundo, foram empregados tubos de ferro galvanizado com paredes de 2mm de espessura, de seções quadrada e retangular, e cantos arredondados com circunferência de 2,2mm de raio. Os tubos foram fixados ao fundo do canal com adesivo de silicone, dispostos desde de 2m a montante e até 3 m a jusante da última seção de medição.

Todos os detalhes descritos estão ilustrados nas fotografias No. 1 a 11 e na Fig. 4-2, apresentados a seguir.



Foto 1: Vista geral do canal experimental situado no hall de ensaios do Laboratório de Hidráulica da EPUSP – CTH



Foto 2: Vista da seção transversal de ensaio e pontas limnimétricas para medição do nível d'água.

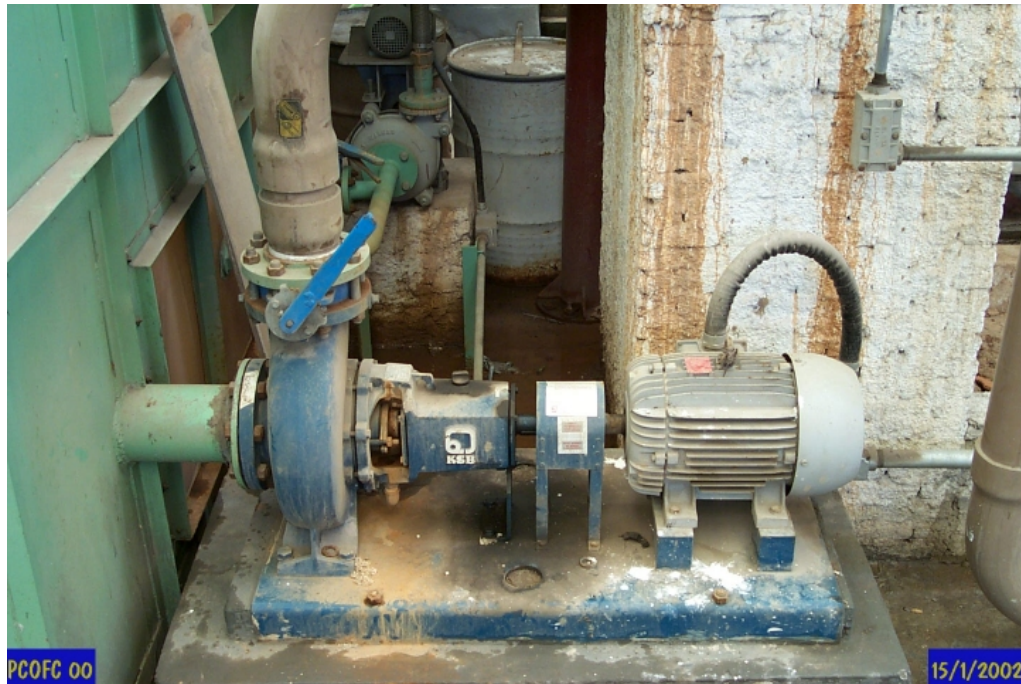


Foto 3: Bomba centrífuga para $240 \text{ m}^3/\text{h}$ e válvula *borboleta* para controle de vazão.



Foto 4: Servo-motor e dispositivo de inclinação do fundo do canal.



Foto 5: Detalhe do medidor de vazão e registro de controle.



Foto 6: Comporta basculante vertical para controle do nível a jusante.

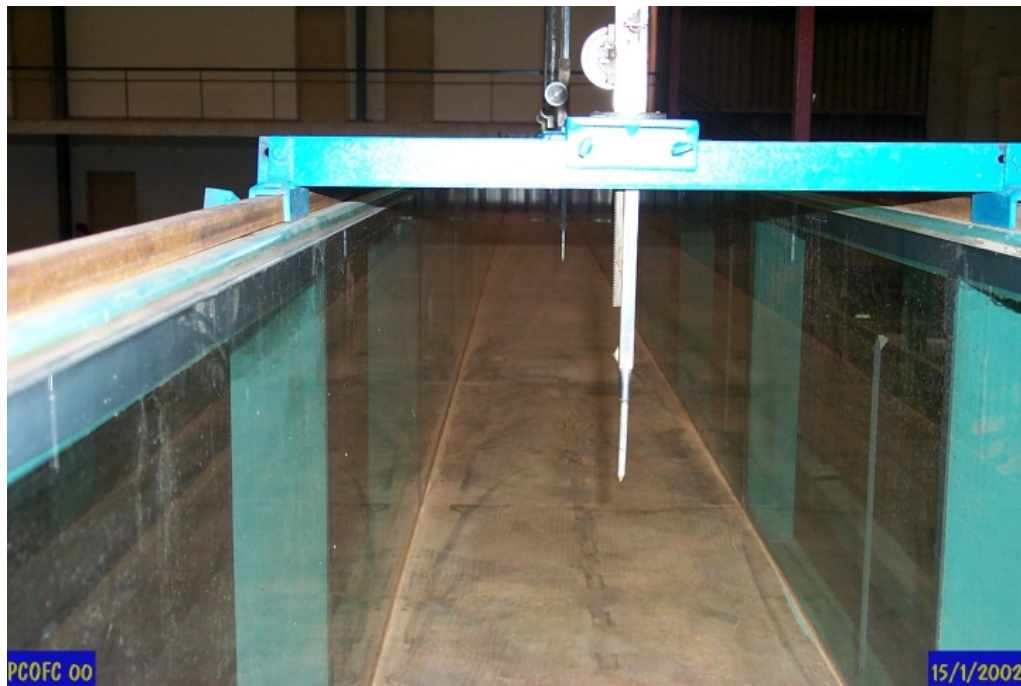


Foto 7: Detalhe da ponta limnimétrica para medição do nível d'água.



Foto 8: Vista da sala de recepção dos sinais de medição e controle de ensaio.

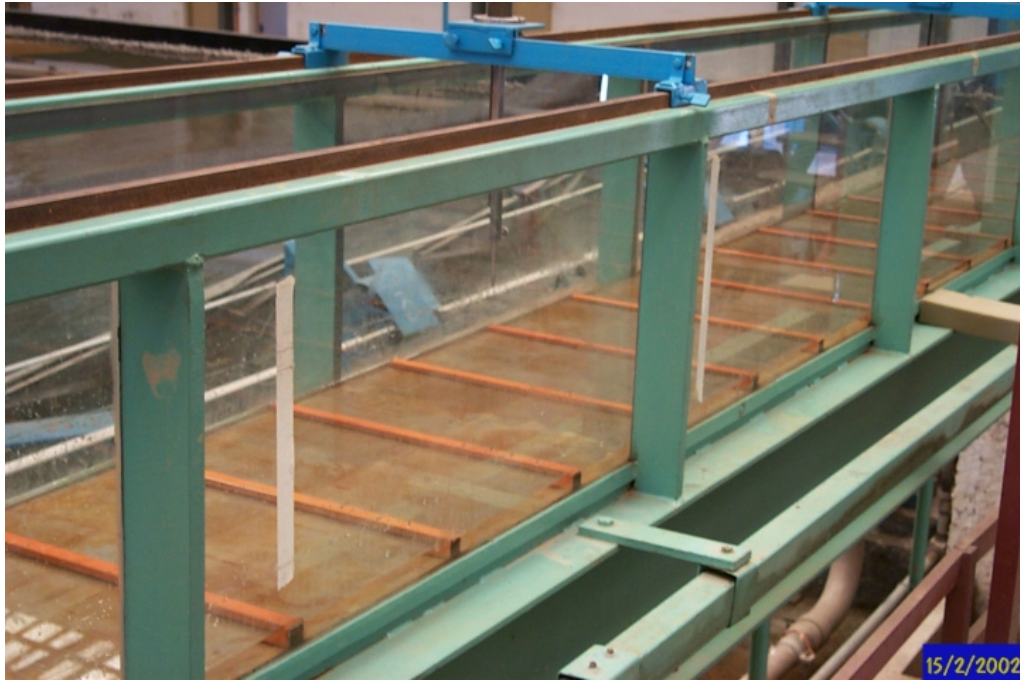


Foto 9: Disposição dos obstáculos de fundo no canal (obstáculos de 25 mm a cada 60 cm).

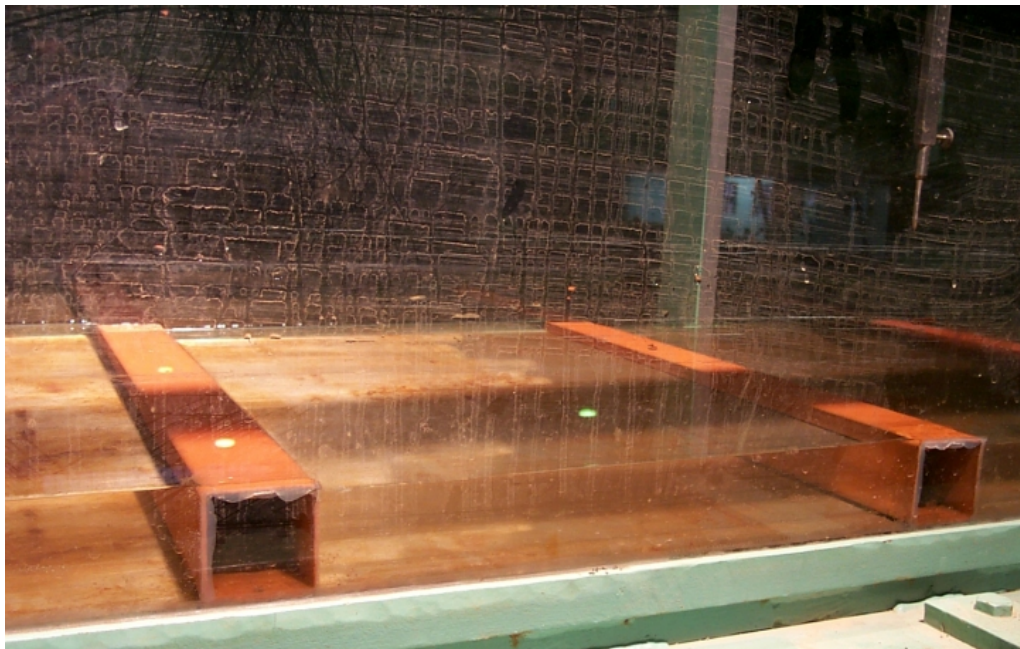


Foto 10: Detalhe do obstáculo de 50 mm de altura e espaçamento de 60 cm.



Foto 11: Vista longitudinal do canal experimental com macro-rugosidade instalada e as pontas de leitura de nível

4.3.2 Método de Ensaio

Os ensaios foram realizados para diferentes combinações de geometria da seção do canal e da declividade de fundo, variando-se a vazão em escoamento. Para cada vazão foram registradas as profundidades nas cinco pontas limnimétricas em duas profundidades diferentes, ao menos. Inicialmente foi ensaiada a situação do canal *liso*, ou seja, sem nenhum obstáculo de fundo simulando os travessões. Em seguida foram ensaiados obstáculos com dimensões (a:t) iguais a 25:25 mm, 50:50 mm,

70:70 mm, 25:50mm e 50:25mm e relações de espaçamento a:E variando entre 1:4, 1:16.

As observações de cada ensaio foram lançadas numa planilha eletrônica já acoplada ao modelo matemático descrito no item anterior, cujo código fonte, desenvolvido em linguagem VBA encontra-se no APÊNDICE B. Um exemplo da planilha de ensaio está apresentado na tabela a seguir. As observações feitas no ensaio são lançadas nos campos em amarelo na planilha, e constam de:

- No. do ensaio em ordem seqüencial única
- Vazão em m^3/h
- Leitura da Inclinação de fundo em cm/11m
- Temperatura em $^{\circ}C$
- Leituras das 5 réguas de nível, em cm

Parte dos cálculos é efetuada através da planilha eletrônica (células brancas) e parte através do modelo matemático (demais células).

Uma vez introduzidos os dados, o modelo matemático determina:

- Linhas d'água através dos três modelos testados (Manning, Logarítmico e Chiu) e relação (U/u^*) para cada seção sem o efeito de parede, e médio do canal experimental, lançando os resultados nas células azuis;
- Variáveis de entrada da função objetivo nas células de cor verde, compostas pelas profundidades na seção 5 (contorno de jusante) e parâmetros do modelo de perda de carga: n de Manning, ψ da lei logarítmica e M de Chiu.
- Valor da Função Objetivo: somatório dos erros quadráticos de cada modelo e correlação de Pearson, apontados nas células de cor laranja;
- Outros valores de Controle: profundidade equivalente uniforme, profundidade crítica do canal, indicador de escoamento acelerado ou retardado (A ou D) e declividade média da linha de energia

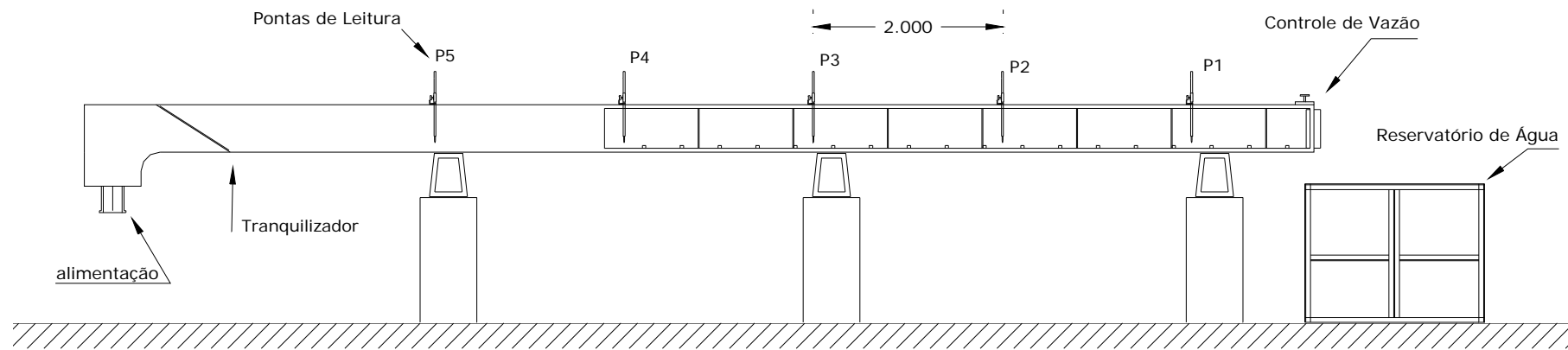


Fig. 4-2: Esquema da Bancada Experimental

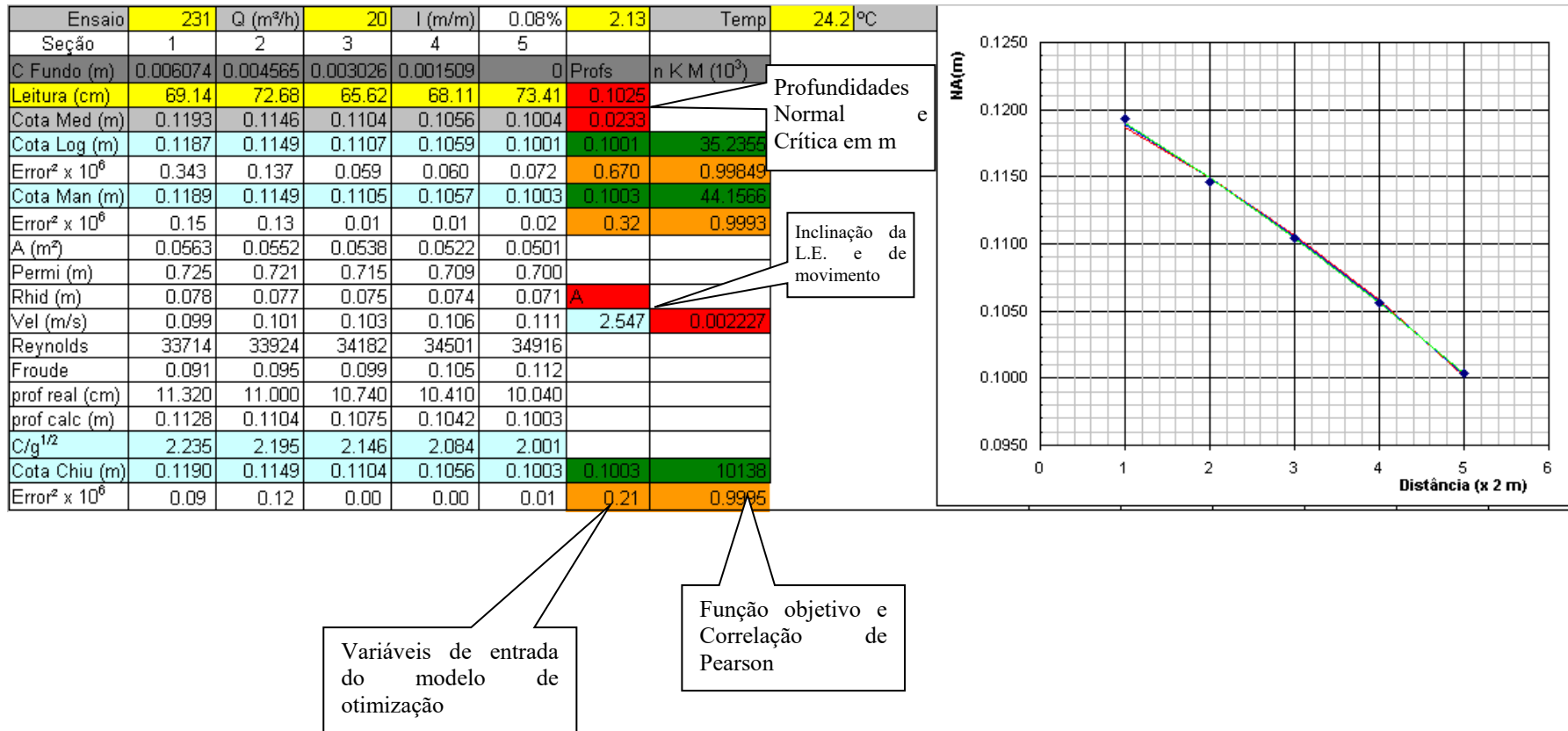


Fig. 4-3: Exemplo da Planilha de Controle do Ensaio

4.4 Resultados Obtidos

4.4.1 Canal sem macro-rugosidade

Estes ensaios tiveram por objetivo a caracterização do canal e a determinação do efeito da rugosidade das paredes laterais na resistência ao escoamento ou f_w e f_b . Para tanto foram realizados ensaios para diferentes vazões e declividades, determinando-se valor de f_g para cada ensaio. Os resultados experimentais estão resumidos na Tab. 4-2, referindo-se à seção correspondente à ponta de leitura P3. Esta seção foi selecionada como *seção de teste* por situar-se a grande distância das extremidades do canal e sofrendo portanto uma influência menor dos contornos.

Verificou-se que o número de Manning global do canal situa-se na faixa 0.010 – 0.011, com uma grande concentração de pontos sobre a curva correspondente a $n = 0.0105$. O fator de atrito f_g resultante varia na faixa 0.015 - 0.025, concentrando-se os pontos sobre a curva correspondente à relação $R_h/k = 400$, como indica a Fig. 4-5.

A composição da rugosidade através da Eq. 4-11 pode então ser feita através do método dos mínimos quadrados, cujos resultados estão indicados na Tab. 4-3. A rugosidade equivalente k_s para o fundo resultou em 0.207 mm e para as paredes 0.012 mm, valor este a ser empregado para o cálculo do efeito de parede nos ensaios com a macro-rugosidade.

A relação entre as tensões tangenciais nas paredes e no fundo do canal experimental, consideradas através dos fatores de atrito f_b e f_w , mostra-se compatível com os dados de KNIGHT e MACDONALD (1979) e com a função estabelecida por RAJARATNAM e MURALIDHAR (apud OLIVERO, AGUIRRE-PE e MONCADA, 2002), porém indicando menores relações entre f_w e f_b quando comparada àqueles pesquisadores. Ressalta-se no entanto que o canal experimental aqui utilizado, diferentemente dos demais pesquisadores, tem paredes laterais menos rugosas (vidro) do que o fundo (metal).

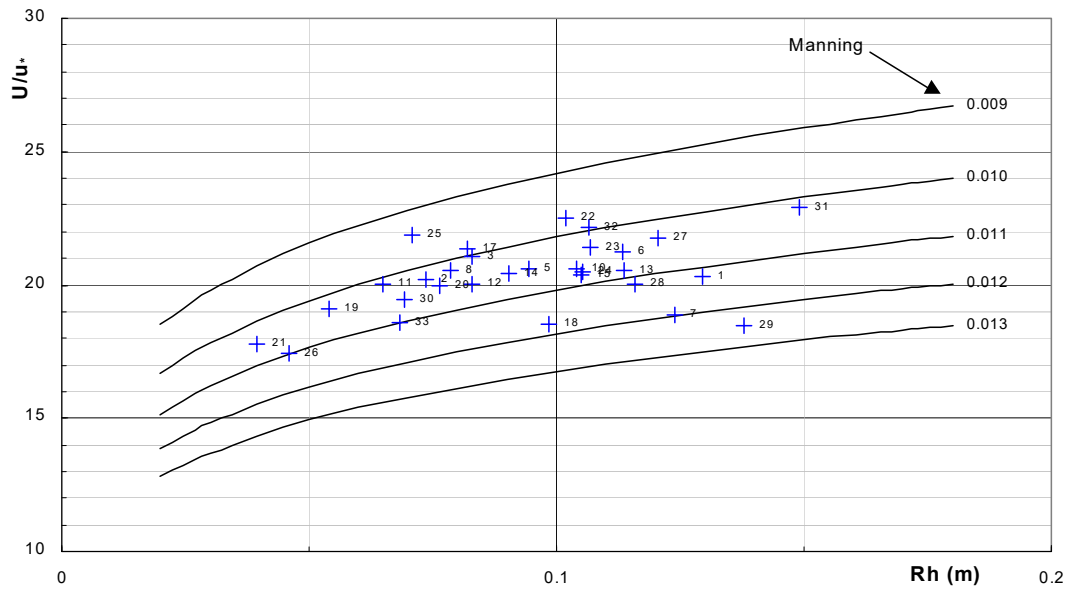


Fig. 4-4: Fator de Resistência de Manning em função do Raio Hidráulico – Canal Experimental sem Rugosidade

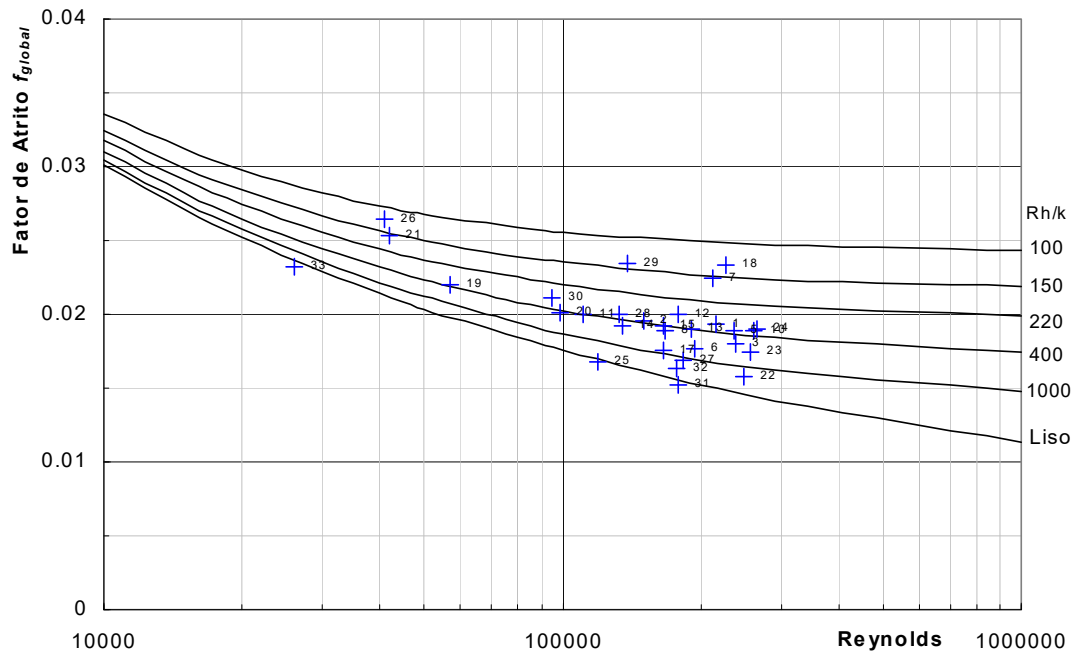


Fig. 4-5: Fator de atrito f – Canal experimental sem macro-rugosidade

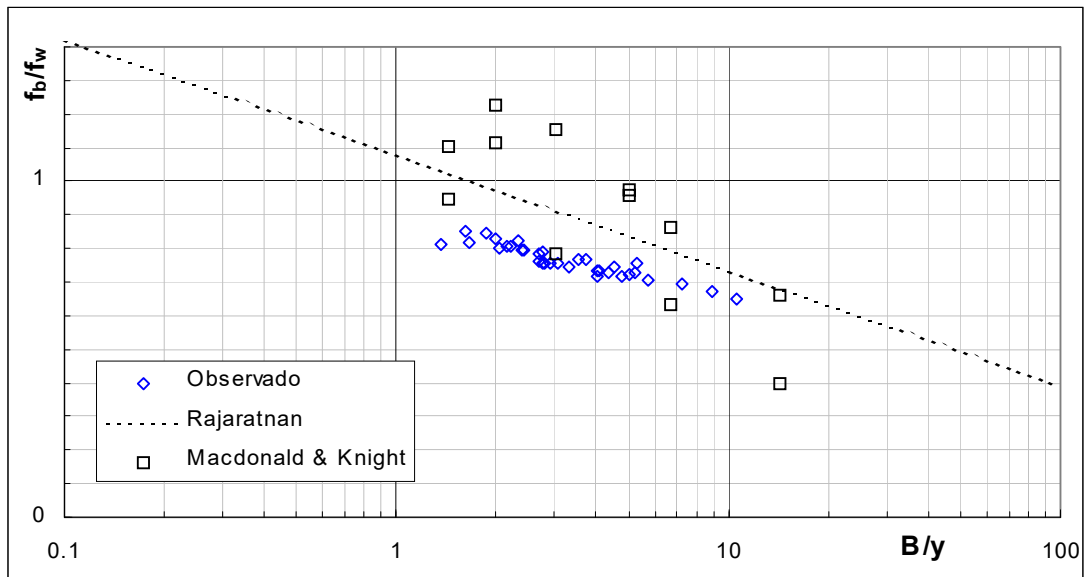


Fig. 4-6: Relação entre as tensões tangenciais nas paredes laterais e no fundo do canal experimental. Comparação com resultados de outros pesquisadores

Tab. 4-2: Resultados Experimentais – Canal Sem a macro-rugosidade

Seq	Decl	T °C	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl dy/dx	k (mm)	n Manning	B/y	y/k	M	Sf	U/u*	
1	1.24%	26.1	174	0.2693	0.1296	0.3589	215759	0.20	0.0682	0.0984	0.998	D	0.402	0.0112	1.86	669	7.44	0.000246	20.34
2	0.10%	23.1	90	0.1044	0.0737	0.4788	150570	0.46	0.0958	0.0634	0.998	D	0.018	0.0102	4.79	5 715	6.66	0.000778	20.22
3	0.16%	25	143	0.1243	0.0830	0.6389	238690	0.56	0.1111	0.0863	0.997	D	0.168	0.0100	4.02	742	7.12	0.001134	21.05
4	0.43%	26.1	100	0.2773	0.1315	0.2003	122119	0.12	0.0962	0.0680	0.996	D		0.0192	1.80	17	8.05	0.000221	11.89
5	0.10%	23.1	160	0.1518	0.0945	0.5854	236097	0.47	0.1447	0.0930	0.995	D	0.021	0.0105	3.29	7 155	7.30	0.000875	20.59
6	0.03%	25	142	0.2070	0.1132	0.3812	194172	0.27	0.2023	0.0859	0.994	D		0.0105	2.42	0	7.09	0.00029	21.25
7	0.04%	22.8	179	0.2451	0.1238	0.4058	212620	0.26	0.2450	0.1003	0.994	D	0.060	0.0120	2.04	4 097	7.64	0.000383	18.86
8	0.07%	25	98	0.1148	0.0787	0.4742	167850	0.44	0.1158	0.0671	0.990	A	0.178	0.0102	4.35	647	6.72	0.00069	20.57
9	1.24%	26.1	174	0.3030	0.1370	0.3190	202598	0.17	0.0779	0.0984	0.989	D	2.300	0.0137	1.65	132	7.90	0.00027	16.76
10	0.16%	25	179	0.1784	0.1041	0.5574	261088	0.41	0.1353	0.1003	0.986	D	0.293	0.0107	2.80	609	7.44	0.00072	20.59
11	0.07%	23.1	63	0.0876	0.0649	0.3994	110646	0.42	0.0827	0.0500	0.985	D	0.017	0.0101	5.71	5 209	6.25	0.000628	20.00
12	0.07%	22.9	113	0.1243	0.0830	0.5050	178016	0.45	0.1263	0.0738	0.984	A	0.023	0.0105	4.02	5 307	6.95	0.000784	20.01
13	0.04%	22.9	149	0.2084	0.1137	0.3972	191677	0.28	0.1988	0.0887	0.982	D	0.025	0.0108	2.40	8 174	7.22	0.000337	20.54
14	0.04%	22.7	90	0.1417	0.0905	0.3528	134731	0.30	0.1356	0.0634	0.981	D	0.020	0.0105	3.53	7 115	6.63	0.000337	20.43
15	0.04%	23	121	0.1810	0.1050	0.3713	165997	0.28	0.1703	0.0772	0.976	D	0.025	0.0108	2.76	7 363	6.99	0.000323	20.39
16	0.00%	23.2	130	0.1360	0.0881	0.5308	200223	0.46	0.0000	0.0810	0.975	A	0.000	0.0088	3.68		6.68	0.000561	24.14
17	0.07%	25	99	0.1221	0.0820	0.4505	166258	0.41	0.1143	0.0676	0.974	D	0.096	0.0099	4.10	1 270	6.65	0.000556	21.33
18	0.07%	22.7	159	0.1624	0.0984	0.5440	226116	0.43	0.1733	0.0927	0.971	A	0.055	0.0117	3.08	2 944	7.55	0.000896	18.52
19	0.04%	22.6	31	0.0690	0.0541	0.2495	56829	0.30	0.0653	0.0312	0.970	D	0.019	0.0103	7.24	3 646	5.48	0.000323	19.08
20	0.04%	22.6	61	0.1100	0.0764	0.3082	99106	0.29	0.1033	0.0489	0.969	D	0.020	0.0104	4.55	5 597	6.21	0.000319	19.97
21	0.07%	25	20	0.0470	0.0395	0.2366	42084	0.34	0.0415	0.0233	0.969	D	0.282	0.0105		166	5.10	0.000459	17.77
22	0.07%	22.4	180	0.1721	0.1019	0.5811	248013	0.44	0.1654	0.1006	0.965	D	0.009	0.0097	2.91	19 295	7.23	0.00067	22.49
23	0.07%	25	179	0.1867	0.1069	0.5327	256123	0.39	0.1783	0.1003	0.964	D	0.178	0.0103	2.68	1 050	7.35	0.000592	21.41
24	0.16%	26.1	178	0.1819	0.1053	0.5438	265416	0.40	0.1353	0.0999	0.959	D	0.314	0.0107	2.75	579	7.44	0.000684	20.49
25	0.00%	23.2	70	0.0991	0.0710	0.3925	119237	0.40	0.0000	0.0536	0.950	A	0.000	0.0094	5.05		6.16	0.000464	21.86
26	0.07%	25	20	0.0561	0.0458	0.1981	40826	0.26	0.0428	0.0233	0.941	D	0.376	0.0110	8.91	149	5.16	0.000289	17.41

Seq	Decl	T °C	Q (m ³ /h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl dy/dx	k (mm)	n Manning	B/y	y/k	M	Sf	U/u _*
27	0.92%	25	142	0.2324	0.1204	0.3394	183930	0.21	0.0624	0.0859	0.941	D	0.105	2.15	2 212	7.03	0.000206	21.77
28	0.07%	25	99	0.2155	0.1157	0.2552	132889	0.17	0.1243	0.0676	0.940	D	0.0112	2.32	0	6.80	0.000144	20.01
29	2.00%	23.2	130	0.3082	0.1380	0.2343	138484	0.12	0.0518	0.0810	0.935	D	1.030	1.62	299	7.34	0.000119	18.49
30	0.16%	26.1	51	0.0956	0.0691	0.2965	95037	0.30	0.0578	0.0434	0.897	D	0.237	5.23	403	6.06	0.000344	19.45
31	1.24%	26.1	172	0.3692	0.1491	0.2588	178883	0.13	0.0636	0.0976	0.863	D	0.000	1.35		7.10	8.77E-05	22.89
32	0.60%	23.2	130	0.1851	0.1064	0.3901	177638	0.27	0.0664	0.0810	0.852	D	0.055	2.70	3 379	6.89	0.000298	22.15
33	0.60%	23.2	15	0.0938	0.0682	0.0888	25940	0.08	0.0181	0.0192	0.837	D	0.000	5.33		4.49	3.42E-05	18.58

Tab. 4-3: Composição da rugosidade de fundo e paredes no canal experimental

Seq	Re _w	Re _b	f _w	f _b	f _g	Σerro ²	f _w /f _b
1	224087	206783	0.0151	0.0178	0.0164	0.00866	0.846
2	511013	213467	0.0135	0.0188	0.0172	0.00535	0.719
3	718561	357397	0.0128	0.0178	0.0161	0.00368	0.719
4	624800	379499	0.0129	0.0174	0.0157	0.01015	0.744
5	428725	354916	0.0135	0.0171	0.0155	0.00502	0.793
6	429508	421055	0.0135	0.0168	0.0152	0.05395	0.802
7	533309	244942	0.0134	0.0184	0.0168	0.00430	0.727
8	369735	448180	0.0138	0.0169	0.0152	0.22984	0.817
9	626977	447387	0.0128	0.0170	0.0152	0.01321	0.756
10	426318	149427	0.0140	0.0198	0.0183	0.00300	0.708
11	535985	266543	0.0133	0.0181	0.0165	0.01185	0.734
12	421617	351459	0.0136	0.0171	0.0155	0.01216	0.795
13	372371	211118	0.0140	0.0183	0.0167	0.00604	0.767
14	395224	286204	0.0138	0.0175	0.0159	0.01101	0.788
15	506746	247440	0.0134	0.0183	0.0167	0.00080	0.735
16	574260	372976	0.0130	0.0173	0.0156	0.05936	0.754
17	262680	72517	0.0152	0.0219	0.0205	0.00231	0.695
18	324431	142695	0.0144	0.0194	0.0179	0.00477	0.745
19	266161	49998	0.0155	0.0239	0.0226	0.00743	0.648
20	608295	418741	0.0129	0.0171	0.0154	0.00020	0.755
21	599089	447393	0.0129	0.0169	0.0152	0.00509	0.762
22	630287	458480	0.0128	0.0169	0.0152	0.01495	0.757
23	420112	166495	0.0139	0.0193	0.0178	0.00110	0.722
24	222758	49987	0.0158	0.0235	0.0221	0.01886	0.672
25	381784	354904	0.0138	0.0170	0.0154	0.00206	0.809
26	287050	247441	0.0145	0.0175	0.0161	0.01493	0.825
27	250822	309197	0.0147	0.0173	0.0159	0.05624	0.852
28	343672	131359	0.0144	0.0198	0.0183	0.00797	0.726
29	300024	443028	0.0142	0.0175	0.0155	0.00008	0.815
30	417493	309178	0.0136	0.0173	0.0158	0.00030	0.786
31	95044	35675	0.0180	0.0238	0.0222	0.00090	0.758
32	310366	166500	0.0144	0.0188	0.0172	0.29753	0.770
33	309250	309141	0.0142	0.0172	0.0157	0.24668	0.830
	K _w =	0.012288	mm		Σ	0.00135	
	k _b =	0.207209	mm				

4.4.2 Ensaios com a macro-rugosidade de fundo

Foram realizadas, no âmbito da pesquisa, 18 séries de ensaios para caracterização dos parâmetros de perda de carga e sua relação com a geometria (altura e largura) além do espaçamento longitudinal. Em cada série foram realizadas medições de linha d'água para diferentes vazões, declividades e configurações da linha d'água, de forma a serem obtidos os dados para determinação das tensões de atrito e posterior análise dos modelos existentes e propostos para a lei de perda de carga desta forma de macro-rugosidade. A características das séries ensaiadas e os limites de variação dos parâmetros hidráulicos encontrados estão listados a seguir.

Tab. 4-4: Ensaios realizados com travessões de seção retangular

Série	Seção do travessão (a x t)	Relação E/a
1	25 x 25 mm	4 : 1
2	25 x 25 mm	8 : 1
3	25 x 25 mm	9 : 1
4	25 x 25 mm	12 : 1
5	25 x 25 mm	16 : 1
6	50 x 50 mm	4:1
7	50 x 50 mm	8:1
8	50 x 50 mm	12:1
9	50 x 50 mm	16:1
10	70 x 70 mm	4:1
11	70 x 70 mm	6:1
12	70 x 70 mm	8:1
13	70 x 70 mm	12:1
14	25 x 50 mm	6:1
15	25 x 50 mm	9:1
16	25 x 50 mm	12:1
17	25 x 50 mm	18:1
18	50 x 25 mm	9:1

Tab. 4-5: Variação dos Principais parâmetros em modelo

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
Declividade de fundo (%)	0	2.15
Velocidade m/s	0.046	0.708
Reynolds	13517	293174
Profundidades (m)	0.044	0.472
Temperatura da água °C	22	28.4
Parâmetro de Resistência ao Escoamento U/u*	1.78	10.62

As tabelas a seguir apresentam os resultados das medições realizadas e os cálculos efetuados com o modelo matemático descrito no capítulo anterior, para a determinação das tensões de atrito e dos parâmetros dos modelos matemáticos testados.

O conteúdo das colunas das tabelas está indicado a seguir:

Coluna	: Conteúdo
Seq	: Número de ordem do ensaio na série
Ensaio	: Número seqüencial geral para todos ensaios realizados
Decl	: Declividade de fundo
Tc	: Temperatura da água tomada durante o ensaio
a	: altura do travessão em mm
E	: Espaçamento longitudinal do travessão
Q	: Vazão do ensaio em m ³ /h
Prof	: Profundidade medida na seção 3 do modelo
Rh	: Raio Hidráulico calculado pela relação (Área ÷ perímetro da seção do modelo)
Vel	: Velocidade na seção de medição 3
Rey	: Número de Reynolds calculado a partir do Raio Hidráulico
Froude	: Número de Froude F_r
Prof Norm	: Profundidade normal calculada a partir da equação de Chezy
Prof Crít	: Profundidade Crítica calculada a partir da condição $F_r=1$
Correl	: Coeficiente de Correlação de Pearson do ajuste da linha d'água efetuado pelo modelo matemático
dy/dx	: indica o sinal da variação da profundidade do escoamento D → - (negativo) A → + (positivo)
Ψ	: parâmetro de macro-rugosidade utilizado no modelo logarítmico
n	: coeficiente de rugosidade de Manning
y/a	: relação profundidade e altura da macro-rugosidade
y/Ψ	: relação profundidade e parâmetro de macro-rugosidade
M	: número M de CHIU
U/u	: velocidade adimensional

Tab. 4-6: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 1

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
1	140	0.09%	24.2	25	10	11	0.0624	0.0500	0.0978	21519	0.12	0.0873	0.0156	0.6908	A	22.35	0.0704	2.5	2.79	8.79	2.90
2	138	0.02%	24.2	25	10	11	0.0655	0.0520	0.0932	21305	0.12	0.1437	0.0156	0.9875	A	20.64	0.0626	2.62	3.17	8.50	3.27
3	121	0.00%	23.1	25	10	17	0.0763	0.0586	0.1234	30870	0.14	0.0000	0.0209	0.9536	A	24.42	0.0656	3.05	3.12	9.05	3.22
4	120	0.00%	23.1	25	10	17	0.0783	0.0596	0.1206	30703	0.14	0.0000	0.0209	0.9715	A	18.28	0.0510	3.13	4.28	8.46	4.11
5	141	0.09%	24.2	25	10	25	0.0818	0.0617	0.1694	46028	0.18	0.1338	0.0270	0.9933	A	22.2	0.0579	3.27	3.68	9.18	3.69
6	122	0.00%	23.1	25	10	45	0.1043	0.0737	0.2391	75255	0.24	0.0000	0.0399	0.9979	A	19.92	0.0472	4.17	5.24	9.29	4.68
7	119	0.00%	23.1	25	10	17	0.1100	0.0764	0.0859	28002	0.08	0.0000	0.0209	0.6012	A	15.59	0.0401	4.4	7.05	7.76	5.53
8	142	0.09%	24.2	25	10	25	0.1106	0.0767	0.1256	42379	0.12	0.1055	0.0270	0.9146	D	16.41	0.0411	4.42	6.74	8.27	5.40
9	139	0.02%	24.2	25	10	11	0.1160	0.0793	0.0527	18369	0.05	0.1106	0.0156	0.4707	D	18.5	0.0429	4.64	6.27	7.39	5.19
10	123	0.00%	23.1	25	10	45	0.1167	0.0796	0.2142	72762	0.20	0.0000	0.0399	0.9785	A	16.26	0.0402	4.67	7.18	8.88	5.57
11	146	0.09%	24.2	25	10	80	0.1269	0.0843	0.3497	129679	0.31	0.2442	0.0586	0.9987	A	18.41	0.0417	5.08	6.89	9.59	5.46
12	135	0.02%	24.2	25	10	102	0.1436	0.0913	0.3940	158307	0.33	0.5554	0.0689	0.9997	A	18.2	0.0399	5.75	7.89	9.72	5.84
13	151	0.50%	24.2	25	10	160	0.1530	0.0950	0.5805	242612	0.45	0.2046	0.0930	0.9956	A	17.1	0.0378	6.12	8.94	10.07	6.20
14	145	0.09%	24.2	25	10	80	0.1545	0.0955	0.2877	120897	0.23	0.2199	0.0586	0.9942	A	15.69	0.0362	6.18	9.85	9.19	6.47
15	143	0.09%	24.2	25	10	25	0.1562	0.0961	0.0889	37624	0.07	0.0958	0.0270	0.6315	D	15.22	0.0356	6.25	10.26	7.79	6.59
16	128	0.00%	24.2	25	10	126	0.1587	0.0971	0.4406	188362	0.35	0.0000	0.0793	0.9998	A	17.74	0.0382	6.35	8.95	9.82	6.20
17	136	0.02%	24.2	25	10	102	0.1589	0.0972	0.3565	152458	0.29	0.5194	0.0689	0.997	A	16.48	0.0368	6.36	9.64	9.49	6.41
18	124	0.00%	23.1	25	10	45	0.1612	0.0980	0.1551	64892	0.12	0.0000	0.0399	0.7478	A	13.79	0.0339	6.45	11.69	8.36	6.95
19	147	0.09%	24.2	25	10	161	0.1719	0.1019	0.5198	233167	0.40	0.3787	0.0934	0.9999	A	17.09	0.0367	6.88	10.06	9.98	6.53
20	118	0.00%	23.1	25	10	16	0.1818	0.1053	0.0489	21971	0.04	0.0000	0.0200	0.1377	A	4.155	0.0225	7.27	43.76	6.07	10.69
21	127	0.00%	24.2	25	10	124	0.1823	0.1054	0.3778	175318	0.28	0.0000	0.0785	0.9982	A	17.23	0.0361	7.29	10.58	9.62	6.67
22	134	0.02%	24.2	25	10	183	0.1850	0.1064	0.5489	257028	0.41	0.8162	0.1018	0.9664	A	16	0.0350	7.4	11.57	9.99	6.92
23	129	0.00%	24.2	25	10	183	0.1888	0.1077	0.5377	254764	0.40	0.0000	0.1018	0.9994	A	18.86	0.0374	7.55	10.01	10.13	6.52
24	148	0.09%	24.2	25	10	161	0.1998	0.1111	0.4476	218780	0.32	0.3696	0.0934	0.9939	A	17.57	0.0356	7.99	11.37	9.84	6.88
25	137	0.02%	24.2	25	10	102	0.2107	0.1143	0.2689	135325	0.19	0.4878	0.0689	0.9659	A	16.28	0.0341	8.43	12.94	9.20	7.24
26	133	0.02%	24.2	25	10	183	0.2146	0.1155	0.4738	240770	0.33	0.7625	0.1018	0.9868	A	14.35	0.0324	8.58	14.95	9.75	7.65

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
27	130	0.00%	24.2	25	10	183	0.2410	0.1227	0.4218	227801	0.27	0.0000	0.1018	0.9996	A	15.68	0.0326	9.64	15.38	9.72	7.73
28	150	0.50%	24.2	25	10	160	0.2418	0.1229	0.3676	198869	0.23	0.1783	0.0930	0.9986	D	13.85	0.0312	9.67	17.46	9.47	8.09
29	149	0.09%	24.2	25	10	161	0.2745	0.1308	0.3258	187630	0.20	0.3592	0.0934	0.9888	D	19.23	0.0343	11	14.27	9.64	7.52
30	144	0.09%	24.2	25	10	80	0.2960	0.1355	0.1502	89568	0.09	0.2526	0.0586	0.308	D	35.65	0.0436	11.8	8.30	9.35	5.99
31	132	0.02%	24.2	25	10	183	0.3156	0.1395	0.3222	197779	0.18	0.8183	0.1018	0.9895	A	22.2	0.0351	12.6	14.22	9.77	7.51
32	131	0.00%	24.2	25	10	183	0.3187	0.1401	0.3190	196693	0.18	0.0000	0.1018	0.9844	A	18.73	0.0330	12.7	17.01	9.62	8.02
33	126	0.00%	24.2	25	10	124	0.3283	0.1419	0.2098	131069	0.12	0.0000	0.0785	0.634	A	29.32	0.0389	13.1	11.20	9.52	6.83
34	125	0.00%	23.1	25	10	45	0.3409	0.1442	0.0733	45159	0.04	0.0000	0.0399	0.0972	A	12.05	0.0001	13.6	28.29	7.59	9.45

Tab. 4-7: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 2

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
1	97	0.70%	28.1	25	20	8	0.0444	0.0376	0.1003	18476	0.12	0.0479	0.0126	0.9999	D	23.69	0.1060	1.78	1.87	9.48	1.78
2	98	0.29%	28.1	25	20	8	0.0446	0.0378	0.0998	18463	0.13	0.0480	0.0126	0.9983	D	16.69	0.0684	1.79	2.67	8.48	2.78
3	99	0.29%	28.1	25	20	8	0.0500	0.0416	0.0891	18132	0.11	0.0546	0.0126	0.9992	A	22.05	0.0836	2	2.27	8.90	2.32
4	82	1.16%	26	25	20	42	0.0774	0.0590	0.3023	82437	0.27	0.0861	0.0381	0.8939	D	24.23	0.0636	3.1	3.20	10.00	3.29
5	100	0.29%	28.1	25	20	8	0.0805	0.0609	0.0552	16456	0.06	0.0381	0.0126	0.8366	D	16.49	0.0476	3.22	4.88	7.42	4.48
6	78	1.16%	26	25	20	16	0.0873	0.0646	0.1020	30474	0.09	0.0390	0.0200	0.9929	D	17.18	0.0493	3.49	5.08	8.31	4.60
7	101	0.29%	28.1	25	20	8	0.0915	0.0670	0.0486	15924	0.05	0.0378	0.0126	0.557	D	18.14	0.0470	3.66	5.05	7.33	4.58
8	94	0.70%	28.1	25	20	51	0.0916	0.0669	0.3100	101540	0.29	0.1034	0.0434	0.9949	D	22.07	0.0534	3.66	4.15	9.76	4.03
9	85	1.16%	26	25	20	84	0.1028	0.0726	0.4558	153080	0.38	0.1202	0.0606	0.9987	A	23	0.0520	4.11	4.47	10.11	4.23
10	95	0.70%	28.1	25	20	51	0.1034	0.0729	0.2753	98227	0.24	0.0995	0.0434	0.9992	D	21.97	0.0505	4.14	4.71	9.59	4.38
11	104	0.29%	28.1	25	20	66	0.1180	0.0803	0.3102	121847	0.28	0.1621	0.0516	0.9991	A	24.72	0.0508	4.72	4.77	9.84	4.42
12	81	1.16%	26	25	20	42	0.1184	0.0802	0.1974	73258	0.16	0.0656	0.0381	0.9948	D	17.78	0.0421	4.73	6.66	8.90	5.36
13	114	2.15%	27	25	20	153	0.1200	0.0811	0.7079	272820	0.50	0.1438	0.0903	0.9029	A	24.81	0.0503	4.8	4.84	10.75	4.46
14	83	1.16%	26	25	20	84	0.1244	0.0827	0.3779	144433	0.29	0.1148	0.0606	0.9961	D	23.08	0.0486	4.98	5.39	10.01	4.77
15	103	0.29%	28.1	25	20	66	0.1245	0.0831	0.2944	119786	0.25	0.1608	0.0516	0.9982	A	25.34	0.0502	4.98	4.91	9.80	4.50
16	93	0.70%	25.9	25	20	109	0.1274	0.0845	0.4748	184899	0.38	0.1593	0.0720	0.5102	A	22.71	0.0466	5.1	5.61	10.18	4.88
17	79	1.16%	26	25	20	16	0.1283	0.0848	0.0693	27166	0.05	0.0524	0.0200	0.8866	D	43.96	0.0783	5.13	2.92	9.20	3.03
18	92	0.70%	25.9	25	20	109	0.1389	0.0892	0.4370	179648	0.34	0.1584	0.0720	0.3309	D	23.81	0.0462	5.56	5.83	10.13	4.99
19	105	0.29%	28.1	25	20	66	0.1443	0.0915	0.2542	113801	0.21	0.1452	0.0516	0.9339	D	22.08	0.0435	5.77	6.53	9.41	5.31
20	86	1.16%	25.9	25	20	184	0.1520	0.0945	0.6731	293229	0.48	0.1860	0.1021	0.9959	D	23.47	0.0441	6.08	6.48	10.57	5.28
21	96	0.70%	28.1	25	20	51	0.1538	0.0952	0.1843	85864	0.14	0.0954	0.0434	0.9362	D	25.32	0.0474	6.15	6.07	9.32	5.10
22	112	2.15%	27	25	20	153	0.1605	0.0972	0.5347	246878	0.34	0.1330	0.0903	0.9987	D	21.92	0.0450	6.42	7.32	10.46	5.63
23	90	0.70%	25.9	25	20	181	0.1657	0.0997	0.6061	278706	0.44	0.2217	0.1010	0.9973	A	24.91	0.0442	6.63	6.65	10.54	5.36
24	89	0.70%	25.9	25	20	181	0.1730	0.1022	0.5815	274095	0.41	0.2183	0.1010	0.9999	D	24.71	0.0433	6.92	7.00	10.47	5.50

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
25	102	0.29%	28.1	25	20	66	0.1922	0.1086	0.1908	101464	0.14	0.1428	0.0516	0.986	D	25.33	0.0425	7.69	7.59	9.25	5.73
26	84	1.16%	26	25	20	84	0.1955	0.1097	0.2388	121097	0.16	0.0999	0.0606	0.721	D	20.78	0.0397	7.82	9.41	9.40	6.34
27	115	0.05%	27	25	20	154	0.1983	0.1106	0.4312	226625	0.31	0.5812	0.0907	0.9993	A	29.31	0.0453	7.93	6.76	10.34	5.41
28	87	1.16%	25.9	25	20	184	0.2091	0.1138	0.4894	256796	0.31	0.1806	0.1021	0.9877	D	25.43	0.0423	8.36	8.22	10.39	5.96
29	80	1.16%	26	25	20	42	0.2165	0.1160	0.1078	57818	0.07	0.0634	0.0381	0.4848	D	24.91	0.0400	8.66	8.69	8.54	6.12
30	88	0.70%	25.9	25	20	181	0.2262	0.1187	0.4449	243513	0.28	0.2157	0.1010	0.992	D	28.41	0.0426	9.05	7.96	10.34	5.87
31	91	0.70%	25.9	25	20	109	0.2320	0.1203	0.2610	144834	0.16	0.1433	0.0720	0.9855	D	25.2	0.0401	9.28	9.21	9.61	6.28
32	106	0.29%	27	25	20	66	0.2610	0.1277	0.1405	85229	0.09	0.1508	0.0516	0.9497	D	36.28	0.0459	10.4	7.20	9.30	5.58
33	109	0.29%	27	25	20	179	0.2612	0.1277	0.3808	231083	0.23	0.2902	0.1003	0.9953	D	29.23	0.0413	10.4	8.93	10.19	6.19
34	113	2.15%	27	25	20	153	0.2724	0.1303	0.3121	193288	0.17	0.1030	0.0903	0.2984	D	13.23	0.0311	10.9	20.60	9.42	8.56
35	116	0.05%	27	25	20	154	0.2729	0.1305	0.3135	194356	0.19	0.5207	0.0907	0.985	A	27.45	0.0396	10.9	9.94	9.91	6.50
36	107	0.29%	27	25	20	66	0.3351	0.1432	0.1094	74430	0.06	0.2074	0.0516	0.8651	D	90.93	0.0715	13.4	3.69	10.20	3.69
37	110	0.29%	27	25	20	153	0.3378	0.1437	0.2516	171760	0.14	0.2370	0.0903	-0.674	D	26.19	0.0369	13.5	12.90	9.65	7.23
38	117	0.05%	27	25	20	154	0.3834	0.1513	0.2231	160411	0.11	0.5997	0.0907	-0.509	D	40.92	0.0470	15.3	9.37	10.16	6.33
39	108	0.29%	27	25	20	66	0.3950	0.1531	0.0928	67522	0.05	0.2017	0.0516	-0.723	D	97.78	0.0688	15.8	4.04	10.00	3.95
40	111	0.29%	27	25	20	153	0.4187	0.1565	0.2030	150988	0.10	0.2891	0.0903	0.9535	D	54.59	0.0481	16.7	7.67	10.16	5.76

Tab. 4-8: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 3

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
1	571	0.10%	22.9	25	22.5	15	0.0699	0.0547	0.1190	27640	0.14	0.0957	0.0192	0.9997	A	21.8	0.0625	2.8	3.21	8.83	3.29
2	587	0.13%	24.2	25	22.5	16	0.0794	0.0603	0.1120	29692	0.12	0.0884	0.0200	0.9997	D	22.11	0.0580	3.18	3.59	8.68	3.62
3	572	0.10%	23	25	22.5	15	0.0865	0.0642	0.0964	26362	0.10	0.0858	0.0192	0.9974	D	21.02	0.0532	3.46	4.11	8.37	4.00
4	586	0.13%	24	25	22.5	27	0.1000	0.0714	0.1500	46896	0.15	0.1196	0.0284	0.9993	A	23.76	0.0536	4	4.21	9.01	4.06
5	569	0.07%	22.8	25	22.5	20	0.1082	0.0755	0.1027	32834	0.10	0.1082	0.0233	0.9971	D	20.9	0.0475	4.33	5.18	8.36	4.65
6	573	0.10%	23.1	25	22.5	30	0.1110	0.0769	0.1501	49276	0.14	0.1272	0.0305	0.9985	D	21.29	0.0475	4.44	5.21	8.81	4.67
7	585	0.13%	23.8	25	22.5	44	0.1261	0.0838	0.1938	70723	0.17	0.1588	0.0393	0.999	A	24.88	0.0493	5.04	5.07	9.29	4.59
8	584	0.13%	23.6	25	22.5	61	0.1515	0.0943	0.2236	91336	0.18	0.1921	0.0489	0.9996	A	25.54	0.0464	6.06	5.93	9.45	5.04
9	565	0.07%	20.8	25	22.5	29	0.1667	0.1000	0.0967	38720	0.07	0.1300	0.0298	0.9723	D	23.46	0.0428	6.67	7.10	8.37	5.55
10	574	0.10%	23.3	25	22.5	71	0.1756	0.1031	0.2247	99479	0.17	0.2225	0.0541	0.9983	D	25.46	0.0438	7.02	6.90	9.44	5.46
11	583	0.04%	24.8	25	22.5	51	0.1922	0.1087	0.1474	71671	0.11	0.2499	0.0434	0.9923	A	26.79	0.0436	7.69	7.17	9.02	5.57
12	582	0.04%	24.5	25	22.5	63	0.2198	0.1170	0.1592	82642	0.11	0.2953	0.0500	0.9883	A	29.84	0.0440	8.79	7.37	9.23	5.65
13	575	0.10%	23.5	25	22.5	110	0.2317	0.1203	0.2637	136911	0.17	0.3058	0.0725	0.9949	D	29.66	0.0431	9.27	7.81	9.79	5.81
14	570	0.07%	23.2	25	22.5	89	0.2324	0.1204	0.2128	109708	0.14	0.2988	0.0629	0.9958	D	30.5	0.0437	9.3	7.62	9.58	5.74
15	566	0.07%	21.2	25	22.5	70	0.2340	0.1209	0.1662	81353	0.11	0.2502	0.0536	0.9872	D	30.2	0.0439	9.36	7.75	9.30	5.79
16	590	0.10%	20.9	25	22.5	181	0.2492	0.1248	0.4035	202255	0.26	0.4518	0.1010	0.9968	A	30.61	0.0428	9.97	8.14	10.29	5.93
17	593	0.10%	22.2	25	22.5	61	0.2499	0.1250	0.1356	70581	0.09	0.1916	0.0489	0.9669	D	28.62	0.0414	9.99	8.73	8.98	6.13
18	591	0.10%	21.4	25	22.5	139	0.2505	0.1251	0.3082	157090	0.20	0.3624	0.0847	0.9962	A	29.95	0.0423	10	8.36	9.98	6.01
19	588	0.13%	24.4	25	22.5	146	0.2513	0.1253	0.3227	178992	0.20	0.3501	0.0875	0.9992	A	31.09	0.0430	10.1	8.09	10.07	5.91
20	592	0.10%	21.8	25	22.5	99	0.2514	0.1253	0.2188	112944	0.14	0.2729	0.0676	0.9918	D	28.25	0.0411	10.1	8.90	9.51	6.18
21	594	0.10%	22.6	25	22.5	20	0.2518	0.1254	0.0441	23310	0.03	0.0497	0.0233	-0.106	D	1.41	0.0173	10.1	178.62	5.44	14.67
22	581	0.04%	24.1	25	22.5	84	0.2641	0.1284	0.1767	99596	0.11	0.3690	0.0606	0.9755	D	33.64	0.0439	10.6	7.85	9.48	5.83
23	589	0.13%	24.6	25	22.5	180	0.2816	0.1324	0.3551	209253	0.21	0.4145	0.1006	0.9955	A	33.75	0.0431	11.3	8.35	10.27	6.00
24	580	0.04%	23.8	25	22.5	100	0.2900	0.1343	0.1915	111946	0.11	0.4088	0.0680	0.9951	D	32.46	0.0420	11.6	8.94	9.54	6.19

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m ³ /h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
25	576	0.10%	22.6	25	22.5	180	0.2955	0.1354	0.3384	192980	0.20	0.4360	0.1006	0.9972	A	31.73	0.0414	11.8	9.31	10.16	6.31
26	567	0.07%	21.8	25	22.5	120	0.2972	0.1358	0.2243	125445	0.13	0.3541	0.0768	0.9994	D	30.05	0.0403	11.9	9.89	9.64	6.48
27	579	0.04%	23.5	25	22.5	130	0.3322	0.1426	0.2174	133877	0.12	0.4976	0.0810	0.9812	D	33.87	0.0412	13.3	9.81	9.70	6.46
28	578	0.04%	23.2	25	22.5	154	0.3765	0.1502	0.2273	146166	0.12	0.5897	0.0907	0.9962	D	39.74	0.0427	15.1	9.47	9.97	6.36
29	568	0.07%	22.4	25	22.5	179	0.3904	0.1524	0.2547	162561	0.13	0.5152	0.1003	0.9877	D	41.52	0.0431	15.6	9.40	10.14	6.34
30	577	0.04%	22.9	25	22.5	179	0.4269	0.1577	0.2330	155944	0.11	0.6587	0.1003	0.9848	D	41.14	0.0419	17.1	10.38	9.99	6.62

Tab. 4-9: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 4

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
1	159	0.50%	25.2	25	30	23	0.0656	0.0520	0.1948	45791	0.21	0.0738	0.0255	0.9981	A	20.02	0.0604	2.62	3.28	9.26	3.36
2	173	0.10%	25.2	25	30	13.5	0.0649	0.0516	0.1153	26922	0.14	0.0915	0.0179	0.998	A	21.1	0.0642	2.6	3.08	8.80	3.18
3	163	0.22%	25.2	25	30	47	0.0991	0.0711	0.2629	84533	0.26	0.1418	0.0411	0.9975	A	22.01	0.0516	3.96	4.50	9.56	4.25
4	177	0.06%	25.2	25	30	32	0.0930	0.0679	0.1907	58581	0.20	0.1737	0.0318	0.9972	A	21.11	0.0516	3.72	4.41	9.15	4.19
5	183	0.00%	25.2	25	30	103	0.1627	0.0986	0.3515	156764	0.28	0.0000	0.0694	0.9971	A	25.21	0.0450	6.51	6.45	9.95	5.27
6	162	0.22%	25.2	25	30	22	0.0737	0.0570	0.1654	42673	0.18	0.0944	0.0248	0.9969	A	22.01	0.0609	2.95	3.35	9.19	3.42
7	178	0.06%	25.2	25	30	66	0.1277	0.0846	0.2867	109737	0.25	0.2723	0.0516	0.9965	A	22.18	0.0460	5.11	5.76	9.59	4.95
8	164	0.22%	25.2	25	30	47	0.1122	0.0775	0.2327	81524	0.21	0.1361	0.0411	0.9964	A	22.33	0.0486	4.49	5.03	9.38	4.57
9	184	0.00%	25.2	25	30	56	0.1273	0.0844	0.2442	93227	0.22	0.0000	0.0462	0.9962	A	22.56	0.0465	5.09	5.64	9.42	4.89
10	174	0.10%	25.2	25	30	8	0.0540	0.0445	0.0821	16528	0.11	0.0706	0.0126	0.9959	A	20.84	0.0734	2.16	2.59	8.57	2.69
11	182	0.00%	25.2	25	30	134.5	0.1833	0.1058	0.4074	194973	0.30	0.0000	0.0829	0.9958	A	23.59	0.0417	7.33	7.77	10.03	5.80
12	180	0.06%	25.2	25	30	125.5	0.1770	0.1037	0.3936	184599	0.30	0.4299	0.0791	0.9954	A	25.1	0.0435	7.08	7.05	10.06	5.53
13	165	0.22%	25.2	25	30	113	0.1852	0.1064	0.3390	163139	0.25	0.2234	0.0738	0.9949	D	22.29	0.0403	7.41	8.31	9.75	5.99
14	168	0.22%	25.2	25	30	173	0.2395	0.1223	0.4013	222046	0.26	0.2976	0.0980	0.9949	D	23.74	0.0385	9.58	10.09	10.02	6.54
15	169	0.10%	25.2	25	30	173	0.2489	0.1247	0.3862	217887	0.25	0.3990	0.0980	0.9947	A	23.5	0.0380	9.95	10.59	9.97	6.67
16	158	0.50%	25.2	25	30	23	0.0809	0.0610	0.1585	43708	0.16	0.0667	0.0255	0.9947	D	18.69	0.0517	3.24	4.33	8.84	4.15
17	166	0.22%	25.2	25	30	112	0.1559	0.0960	0.3990	173341	0.31	0.2341	0.0734	0.9944	A	22.93	0.0433	6.23	6.80	9.98	5.42
18	167	0.22%	25.2	25	30	171.5	0.2013	0.1115	0.4731	238714	0.33	0.3095	0.0974	0.9941	A	24.23	0.0409	8.05	8.31	10.23	5.99
19	179	0.06%	25.2	25	30	88.5	0.1483	0.0931	0.3313	139561	0.27	0.3432	0.0627	0.9933	A	24.94	0.0464	5.93	5.94	9.88	5.04
20	185	0.00%	25.2	25	30	23	0.0872	0.0647	0.1464	42846	0.16	0.0000	0.0255	0.9932	A	20.83	0.0529	3.49	4.19	8.85	4.05
21	181	0.06%	25.2	25	30	158.5	0.1999	0.1111	0.4402	221291	0.31	0.5092	0.0925	0.9931	A	25.92	0.0424	8	7.71	10.22	5.78
22	172	0.10%	25.2	25	30	72.5	0.1487	0.0932	0.2708	114243	0.22	0.2288	0.0549	0.993	A	22.87	0.0440	5.95	6.50	9.53	5.30
23	186	0.00%	25.2	25	30	8	0.0579	0.0471	0.0766	16318	0.10	0.0000	0.0126	0.9929	A	20.75	0.0693	2.32	2.79	8.42	2.90
24	176	0.06%	25.2	25	30	15	0.0691	0.0542	0.1204	29526	0.14	0.1107	0.0192	0.9929	A	19.61	0.0579	2.76	3.52	8.66	3.56

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
25	170	0.10%	25.2	25	30	174	0.2054	0.1128	0.4704	239998	0.33	0.4277	0.0984	0.9925	A	24.89	0.0412	8.22	8.25	10.25	5.97
26	156	0.50%	25.2	25	30	81	0.1292	0.0851	0.3488	134273	0.29	0.1369	0.0591	0.9916	D	19.62	0.0427	5.17	6.59	9.64	5.33
27	154	0.50%	25.2	25	30	81	0.1138	0.0783	0.3946	139798	0.34	0.1458	0.0591	0.9912	A	20.96	0.0467	4.55	5.43	9.90	4.79
28	171	0.10%	25.2	25	30	73	0.1320	0.0864	0.3070	120037	0.27	0.2361	0.0551	0.9909	A	22.29	0.0455	5.28	5.92	9.67	5.03
29	155	0.50%	25.2	25	30	81	0.1122	0.0775	0.4004	140437	0.35	0.1419	0.0591	0.9894	A	19.46	0.0449	4.49	5.77	9.81	4.96
30	152	0.50%	23.1	25	30	159.5	0.2007	0.1113	0.4417	209886	0.30	0.2038	0.0928	0.9892	D	20.31	0.0378	8.03	9.88	9.96	6.48
31	175	0.06%	25.2	25	30	8	0.0552	0.0453	0.0804	16463	0.11	0.0814	0.0126	0.9868	A	19.9	0.0688	2.21	2.77	8.42	2.89
32	157	0.50%	25.2	25	30	81	0.1980	0.1105	0.2273	113609	0.16	0.1388	0.0591	0.9704	D	26.65	0.0435	7.92	7.43	9.53	5.67
33	160	0.50%	25.2	25	30	23	0.1164	0.0794	0.1098	39442	0.09	0.0675	0.0255	0.9457	D	24.61	0.0527	4.66	4.73	8.75	4.40
34	161	0.22%	25.2	25	30	22	0.1578	0.0967	0.0775	33897	0.06	0.0820	0.0248	0.8229	D	28.75	0.0494	6.31	5.49	8.41	4.81
35	153	0.50%	25.2	25	30	160	0.1618	0.0982	0.5495	244140	0.41	0.1996	0.0930	0.3406	D	16.59	0.0366	6.47	9.75	9.98	6.44

Tab. 4-10: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 5

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
1	68	0.00%	26.7	25	40	15	0.0675	0.0532	0.1232	30911	0.15	0.0000	0.0192	0.9974	A	17.613	0.0205	2.7	3.83	8.52	3.80
2	54	0.09%	26.7	25	40	15	0.0685	0.0538	0.1216	30825	0.14	0.0470	0.0192	0.9943	A	17.528	0.0201	2.74	3.91	8.46	3.85
3	67	0.06%	26.7	25	40	20	0.0734	0.0568	0.1512	40465	0.18	0.0628	0.0233	0.9939	A	17.184	0.0194	2.94	4.27	8.66	4.11
4	27	0.00%	26.7	25	40	15	0.0770	0.0589	0.1081	30018	0.12	0.0000	0.0192	0.995	A	18.665	0.0202	3.08	4.13	8.37	4.01
5	35	0.25%	26.7	25	40	15	0.0807	0.0610	0.1033	29692	0.11	0.0345	0.0192	0.9932	D	18.428	0.0199	3.23	4.38	8.32	4.18
6	66	0.06%	26.7	25	40	20	0.0831	0.0623	0.1338	39305	0.15	0.0589	0.0233	0.984	A	15.931	0.0176	3.32	5.21	8.35	4.67
7	51	0.49%	26.7	25	40	15	0.0844	0.0631	0.0988	29365	0.10	0.0282	0.0192	0.8978	D	18.659	0.0205	3.37	4.52	8.41	4.27
8	69	0.00%	26.7	25	40	15	0.0901	0.0662	0.0925	28867	0.10	0.0000	0.0192	0.9917	A	24.58	0.0235	3.6	3.67	8.57	3.67
9	37	0.25%	26.7	25	40	15	0.0960	0.0694	0.0868	28377	0.09	0.0384	0.0192	0.9836	D	25.977	0.0237	3.84	3.70	8.51	3.70
10	52	0.49%	26.7	25	40	15	0.0994	0.0711	0.0839	28102	0.08	0.0272	0.0192	0.9527	D	19.014	0.0193	3.98	5.23	8.14	4.68
11	50	0.49%	26.7	25	40	15	0.1020	0.0725	0.0817	13533	0.07	0.0257	0.0192	0.7952	D	16.576	0.0176	4.08	6.16	7.96	5.14
12	55	0.09%	26.7	25	40	15	0.1040	0.0734	0.0801	27736	0.08	0.0476	0.0192	0.8185	D	22.468	0.0205	4.16	4.63	8.17	4.33
13	72	0.00%	26.7	25	40	52	0.1118	0.0773	0.2580	94028	0.25	0.0000	0.0440	0.9997	A	19.104	0.0180	4.47	5.85	9.31	5.00
14	28	0.00%	26.7	25	40	15	0.1165	0.0795	0.0715	26789	0.07	0.0000	0.0192	0.9537	A	25.244	0.0214	4.66	4.61	8.19	4.33
15	64	0.06%	26.7	25	40	62	0.1180	0.0802	0.2915	110227	0.27	0.1231	0.0495	0.9991	A	18.286	0.0171	4.72	6.46	9.38	5.27
16	36	0.25%	26.7	25	40	15	0.1267	0.0841	0.0658	26062	0.06	0.0351	0.0192	0.9172	D	24.982	0.0205	5.07	5.07	8.05	4.59
17	71	0.00%	26.7	25	40	52	0.1274	0.0844	0.2266	90163	0.20	0.0000	0.0440	0.9803	A	20.69	0.0179	5.1	6.2	9.23	5.14
18	39	0.25%	26.7	25	40	71	0.1295	0.0853	0.3046	122454	0.26	0.0832	0.0541	0.9987	A	18.37	0.0164	5.2	7.1	9.41	5.52
19	30	0.00%	26.7	25	40	70	0.1345	0.0875	0.2888	119118	0.25	0.0000	0.0536	0.9992	A	19.18	0.0167	5.4	7.0	9.41	5.51
20	57	0.09%	26.7	25	40	70	0.1408	0.0901	0.2762	117245	0.23	0.1147	0.0536	0.9985	A	19.77	0.0166	5.6	7.1	9.39	5.55
21	70	0.00%	26.7	25	40	15	0.1490	0.0933	0.0559	24609	0.05	0.0000	0.0192	-0.311	A	33.34	0.0233	6.0	4.5	8.24	4.23
22	53	0.09%	26.7	25	40	15	0.1491	0.0934	0.0559	24599	0.05	0.0460	0.0192	0.7543	D	26.05	0.0195	6.0	5.7	7.87	4.94
23	26	0.00%	26.7	25	40	15	0.1534	0.0951	0.0543	24337	0.04	0.0000	0.0192	0.3957	A	13.54	0.0129	6.1	11.3	6.74	6.87
24	48	0.49%	26.7	25	40	72	0.1646	0.0992	0.2432	113695	0.18	0.0611	0.0546	0.9961	D	17.35	0.0144	6.6	9.5	9.12	6.36

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u-
25	73	0.00%	26.7	25	40	129	0.1715	0.1018	0.4175	200242	0.32	0.0000	0.0806	0.993	A	19.72	0.0151	6.9	8.7	9.86	6.12
26	75	0.03%	26.7	25	40	129	0.1715	0.1018	0.4175	200240	0.32	0.2563	0.0806	0.9893	A	20.81	0.0156	6.9	8.2	9.92	5.96
27	32	0.00%	26.7	25	40	130	0.1753	0.1031	0.4117	200019	0.31	0.0000	0.0810	0.5891	A	22.41	0.0163	7.0	7.8	10.00	5.82
28	62	0.06%	26.7	25	40	129	0.1763	0.1034	0.4064	198054	0.31	0.1808	0.0806	0.9883	A	18.43	0.0142	7.1	9.6	9.75	6.39
29	65	0.06%	26.7	25	40	62	0.1800	0.1046	0.1914	94383	0.14	0.1268	0.0495	0.98	A	26.52	0.0178	7.2	6.8	9.30	5.42
30	45	0.49%	26.7	25	40	131	0.1854	0.1064	0.3927	196976	0.28	0.0915	0.0814	0.9925	D	19.97	0.0146	7.4	9.3	9.81	6.30
31	41	0.25%	26.7	25	40	130	0.1880	0.1073	0.3841	194264	0.28	0.1175	0.0810	0.9985	D	21.17	0.0150	7.5	8.9	9.84	6.18
32	74	0.00%	26.7	25	40	129	0.2049	0.1126	0.3497	185593	0.25	0.0000	0.0806	0.9971	A	20.11	0.0137	8.2	10.2	9.70	6.57
33	60	0.09%	26.7	25	40	128	0.2103	0.1142	0.3381	181996	0.23	0.1583	0.0802	0.9964	A	22.38	0.0144	8.4	9.4	9.77	6.34
34	76	1.19%	26.7	25	40	130	0.2377	0.1218	0.3039	174499	0.18	0.0635	0.0810	0.958	D	21.86	0.0131	9.5	10.9	9.66	6.75
35	58	0.09%	26.7	25	40	70	0.2521	0.1255	0.1543	91250	0.10	0.1078	0.0536	0.923	D	29.27	0.0152	10.1	8.6	9.16	6.09
36	40	0.25%	26.7	25	40	70	0.2570	0.1267	0.1513	90373	0.09	0.0811	0.0536	0.956	D	32.30	0.0160	10.3	8.0	9.25	5.87
37	49	0.49%	26.7	25	40	72	0.2705	0.1299	0.1479	90550	0.09	0.0678	0.0546	0.9673	D	35.77	0.0169	10.8	7.6	9.38	5.72
38	63	0.06%	26.7	25	40	129	0.2759	0.1311	0.2598	160563	0.16	0.1608	0.0806	0.9774	D	24.07	0.0120	11.0	11.5	9.57	6.90
39	31	0.00%	26.7	25	40	70	0.2781	0.1317	0.1398	86753	0.08	0.0000	0.0536	0.8427	A	29.51	0.0140	11.1	9.4	9.06	6.35
40	34	0.00%	26.7	25	40	130	0.3004	0.1364	0.2404	154597	0.14	0.0000	0.0810	0.9626	A	30.23	0.0130	12.0	9.9	9.73	6.49
41	61	0.09%	26.7	25	40	128	0.3056	0.1375	0.2327	150786	0.13	0.1427	0.0802	0.9905	D	29.29	0.0125	12.2	10.4	9.65	6.63
42	46	0.49%	26.7	25	40	129	0.3076	0.1379	0.2330	151445	0.13	0.0857	0.0806	0.9727	D	33.01	0.0134	12.3	9.3	9.76	6.31
43	43	0.25%	26.7	25	40	130	0.3099	0.1384	0.2331	151983	0.13	0.1165	0.0810	0.9906	D	36.92	0.0148	12.4	8.4	9.89	6.02
44	77	1.19%	26.7	25	40	128	0.3690	0.1490	0.1927	135361	0.10	0.0614	0.0802	0.9761	D	38.54	0.0127	14.8	9.6	9.76	6.39
45	47	0.49%	26.7	25	40	71	0.3724	0.1496	0.1059	74671	0.05	0.0940	0.0541	0.9805	D	99.89	0.0280	14.9	3.7	10.31	3.72
46	38	0.25%	26.7	25	40	70	0.3952	0.1531	0.0984	71013	0.05	0.1249	0.0536	0.9904	D	117.10	0.0304	15.8	3.4	10.46	3.44
47	56	0.09%	26.7	25	40	70	0.3960	0.1533	0.0982	70922	0.05	0.1550	0.0536	0.0194	D	98.09	0.0256	15.8	4.0	8.00	3.95
48	59	0.09%	26.7	25	40	127	0.4036	0.1544	0.1748	127178	0.09	0.1421	0.0798	0.919	D	46.09	0.0125	16.1	8.8	9.81	6.14
49	44	0.49%	26.7	25	40	129	0.4039	0.1544	0.1774	129126	0.09	0.0942	0.0806	0.9509	D	57.40	0.0154	16.2	7.0	10.07	5.52
50	42	0.25%	26.7	25	40	130	0.4205	0.1568	0.1717	126901	0.08	0.1187	0.0810	0.9338	D	60.24	0.0152	16.8	7.0	10.11	5.50
51	29	0.00%	26.7	25	40	70	0.4249	0.1574	0.0915	67891	0.04	0.0000	0.0536	0.6028	A	89.53	0.0220	17.0	4.7	9.93	4.40
52	33	0.00%	26.7	25	40	130	0.4255	0.1575	0.1697	125966	0.08	0.0000	0.0810	0.7442	A	49.73	0.0123	17.0	8.6	9.85	6.07

Tab. 4-11: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 6

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
1	268	0.29%	25.6	50	20	11	0.1008	0.0718	0.0607	19923	0.06	0.0729	0.0156	0.9939	D	43.99	0.0941	2.02	2.29	9.27	2.35
2	269	0.29%	26.7	50	20	15	0.1075	0.0751	0.0776	27476	0.07	0.0851	0.0192	0.9927	D	43.63	0.0871	2.15	2.46	9.42	2.55
3	259	0.05%	26.2	50	20	13	0.1114	0.0771	0.0648	23224	0.06	0.1484	0.0175	0.9906	A	46.97	0.0909	2.23	2.37	9.34	2.44
4	251	0.35%	24.6	50	20	34	0.1122	0.0775	0.1683	58006	0.15	0.1375	0.0331	0.9989	A	44.82	0.0858	2.24	2.50	10.29	2.59
5	272	0.29%	26.7	50	20	16	0.1261	0.0838	0.0705	27850	0.06	0.0811	0.0200	0.9836	D	43.77	0.0760	2.52	2.88	9.12	2.99
6	252	0.35%	24.6	50	20	33	0.1363	0.0882	0.1346	52808	0.11	0.1142	0.0325	0.9975	D	40.79	0.0676	2.73	3.34	9.65	3.41
7	263	0.29%	26.2	50	20	68	0.1471	0.0926	0.2568	110563	0.21	0.1866	0.0526	0.9898	A	37.07	0.0596	2.94	3.97	10.15	3.90
8	258	0.10%	26.2	50	20	54	0.1671	0.1001	0.1796	83603	0.14	0.2241	0.0451	0.9977	A	39.19	0.0579	3.34	4.26	9.78	4.10
9	260	0.05%	26.2	50	20	44	0.1802	0.1047	0.1357	66040	0.10	0.2419	0.0393	0.9948	A	35.9	0.0527	3.60	5.02	9.30	4.56
10	254	0.35%	24.6	50	20	112	0.1956	0.1097	0.3182	155348	0.22	0.2095	0.0734	0.9965	D	31.11	0.0469	3.91	6.29	10.05	5.20
11	262	0.29%	26.2	50	20	172	0.2125	0.1149	0.4496	240122	0.30	0.2973	0.0976	0.9971	A	29.26	0.0441	4.25	7.26	10.37	5.61
12	253	0.35%	24.6	50	20	111	0.2349	0.1211	0.2626	141489	0.17	0.1880	0.0729	0.991	D	26.6	0.0408	4.70	8.83	9.67	6.16
13	265	0.29%	25.6	50	20	69	0.2631	0.1282	0.1457	85415	0.09	0.1743	0.0531	0.9952	D	48.30	0.0535	5.26	5.45	9.70	4.79
14	256	0.35%	24.6	50	20	171	0.2811	0.1323	0.3380	198994	0.20	0.2605	0.0973	0.9976	D	30.42	0.0412	5.62	9.24	10.11	6.29
15	266	0.29%	25.6	50	20	109	0.3164	0.1396	0.1914	122248	0.11	0.2237	0.0720	0.9962	D	45.74	0.0477	6.33	6.92	9.89	5.47
16	257	0.10%	24.6	50	20	171	0.3219	0.1407	0.2951	184780	0.17	0.4216	0.0973	0.9991	D	33.88	0.0416	6.44	9.50	10.05	6.37
17	255	0.35%	24.6	50	20	171	0.3627	0.1480	0.2619	172474	0.14	0.2663	0.0973	0.998	D	37.08	0.0424	7.25	9.78	10.08	6.45
18	261	0.05%	26.2	50	20	159	0.3916	0.1526	0.2256	160011	0.11	0.6035	0.0927	0.989	D	48.57	0.0463	7.83	8.06	10.15	5.90
19	271	0.29%	26.7	50	20	178	0.3978	0.1535	0.2486	179844	0.12	0.3088	0.0999	0.9958	D	45.5	0.0447	7.96	8.74	10.21	6.13
20	264	0.29%	25.6	50	20	68	0.4020	0.1541	0.0940	66248	0.05	0.2311	0.0526	0.9832	D	118.9	0.0798	8.04	3.38	10.42	3.45
21	270	0.29%	26.7	50	20	179	0.4105	0.1554	0.2423	177386	0.12	0.3128	0.1003	0.996	D	47.56	0.0452	8.21	8.63	10.19	6.10
22	267	0.29%	25.6	50	20	109	0.4107	0.1554	0.1474	104790	0.07	0.2408	0.0720	0.9898	D	64.29	0.0526	8.21	6.39	10.00	5.25

Tab. 4-12: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 7

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
1	231	0.08%	24.2	50	40	20	0.1075	0.0753	0.1031	34174	0.10	0.1863	0.0233	0.9978	A	50.2	0.1036	2.1	2.1	10.14	2.15
2	232	0.08%	24.2	50	40	20	0.1762	0.1033	0.0631	25815	0.05	0.1338	0.0233	0.9844	D	47.94	0.0650	3.5	3.7	8.89	3.68
3	233	0.08%	24.2	50	40	68	0.3061	0.1376	0.1234	67263	0.07	0.3042	0.0526	0.9837	D	63.25	0.0589	6.1	4.8	9.84	4.46
4	234	0.08%	24.2	50	40	68	0.1683	0.1006	0.2243	89389	0.17	0.3255	0.0526	0.9776	A	45.62	0.0642	3.4	3.7	10.27	3.69
5	235	0.08%	24.2	50	40	68	0.1920	0.1086	0.1967	84612	0.14	0.3273	0.0526	0.998	A	50.92	0.0647	3.8	3.8	10.23	3.75
6	236	0.08%	24.2	50	40	122	0.2295	0.1197	0.2952	139918	0.20	0.5085	0.0777	0.9979	A	55.76	0.0626	4.6	4.1	10.74	4.00
7	237	0.08%	24.2	50	40	121	0.4016	0.1541	0.1674	102150	0.08	0.4639	0.0772	0.9836	D	71.9	0.0564	8.0	5.6	10.28	4.87
8	238	0.08%	24.2	50	40	175	0.2759	0.1312	0.3524	183036	0.21	0.6366	0.0988	0.9994	A	56.02	0.0572	5.5	4.9	10.87	4.51
9	239	0.16%	24.2	50	40	177	0.2701	0.1298	0.3630	186658	0.22	0.4690	0.0993	0.9988	A	54.5	0.0568	5.4	5.0	10.87	4.53
10	240	0.16%	24.2	50	40	176	0.2406	0.1227	0.4060	197245	0.26	0.4799	0.0991	0.9978	A	52.46	0.0586	4.8	4.6	10.99	4.31
11	241	0.16%	24.2	50	40	100	0.2413	0.1228	0.2302	111957	0.15	0.2963	0.0680	0.9991	D	49.04	0.0560	4.8	4.9	10.26	4.51
12	242	0.16%	24.2	50	40	84	0.2000	0.1111	0.2319	102061	0.16	0.2809	0.0603	0.9983	A	50.14	0.0625	4.0	4.0	10.37	3.91
13	243	0.41%	24.2	50	40	84	0.1615	0.0982	0.2869	111562	0.22	0.2197	0.0603	0.9996	A	50.69	0.0721	3.2	3.2	10.77	3.28
14	244	0.41%	24.2	50	40	43	0.1260	0.0838	0.1873	62168	0.16	0.1515	0.0384	0.9999	D	48.96	0.0847	2.5	2.6	10.47	2.67
15	245	0.41%	24.2	50	40	145	0.2198	0.1170	0.3653	169190	0.24	0.2895	0.0869	0.9993	D	51.1	0.0602	4.4	4.3	10.86	4.13
16	246	0.41%	24.2	50	40	168	0.2475	0.1244	0.3771	185754	0.23	0.3108	0.0961	0.9978	D	51.1	0.0568	5.0	4.8	10.85	4.46
17	247	0.41%	24.2	50	40	26	0.1054	0.0741	0.1346	39479	0.12	0.1182	0.0273	0.9995	D	47.97	0.0988	2.1	2.2	10.31	2.23
18	248	0.41%	24	50	40	172	0.3923	0.1527	0.2436	147307	0.12	0.2968	0.0976	0.9996	D	61.44	0.0522	7.8	6.4	10.53	5.24
19	249	0.41%	24	50	40	174	0.3258	0.1414	0.2959	165754	0.16	0.3078	0.0982	0.9999	D	57.8	0.0543	6.5	5.6	10.69	4.89
20	250	0.41%	24	50	40	79	0.1599	0.0976	0.2725	105312	0.21	0.2104	0.0579	0.9998	A	50.51	0.0723	3.2	3.2	10.71	3.26

Tab. 4-13: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 8

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m ³ /h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u _*
1	282	0.25%	28	50	60	170	0.3328	0.1428	0.2838	197752	0.15	0.3631	0.0969	0.9999	D	56.92	0.0533	6.66	5.85	10.62	4.99
2	284	0.06%	28	50	60	171	0.4092	0.1552	0.2321	175846	0.12	0.6323	0.0973	0.9988	D	66.799	0.0537	8.18	6.13	10.57	5.13
3	276	0.61%	28.4	50	60	70	0.2031	0.1120	0.1916	105880	0.13	0.1450	0.0536	0.9981	D	46.395	0.0591	4.06	4.38	10.05	4.18
4	275	0.61%	28.4	50	60	50	0.1755	0.1031	0.1584	80548	0.11	0.1202	0.0428	0.9980	D	45.357	0.0633	3.51	3.87	9.88	3.83
5	280	0.25%	28	50	60	169	0.2879	0.1338	0.3261	212994	0.19	0.3706	0.0965	0.9974	D	54.245	0.0550	5.76	5.31	10.74	4.72
6	277	0.25%	28.4	50	60	70	0.2295	0.1196	0.1695	100040	0.11	0.1986	0.0536	0.9972	D	50.309	0.0583	4.59	4.56	9.96	4.29
7	278	0.25%	28.4	50	60	148	0.2297	0.1197	0.3579	211390	0.23	0.3503	0.0883	0.9970	A	50.612	0.0585	4.59	4.54	10.81	4.28
8	279	0.25%	28.4	50	60	170	0.2627	0.1281	0.3594	227182	0.22	0.3782	0.0969	0.9968	A	52.415	0.0561	5.25	5.01	10.82	4.56
9	281	0.25%	28	50	60	170	0.3074	0.1379	0.3072	206761	0.17	0.3652	0.0969	0.9964	D	54.493	0.0537	6.15	5.64	10.67	4.89
10	285	0.06%	28	50	60	172	0.2344	0.1210	0.4072	240583	0.27	0.6923	0.0976	0.9949	A	52.418	0.0595	4.69	4.47	11.01	4.24
11	283	0.06%	28	50	60	169	0.3707	0.1493	0.2533	184573	0.13	0.6272	0.0965	0.9948	A	62.567	0.0539	7.41	5.93	10.60	5.03
12	274	0.61%	28.4	50	60	30	0.1393	0.0894	0.1198	52834	0.09	0.0952	0.0305	0.9930	D	45.908	0.0750	2.79	3.03	9.77	3.14
13	273	0.61%	28	50	60	16	0.1068	0.0747	0.0835	30425	0.07	0.0692	0.0200	0.9901	D	41.688	0.0869	2.14	2.56	9.50	2.66

Tab. 4-14: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 9

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u.
1	212	0.07%	23.3	50	80	186	0.3936	0.1529	0.2625	172324	0.13	0.6184	0.1029	0.998	D	54.871	0.0491	7.87	7.17	10.48	5.57
2	202	0.10%	23.3	50	80	102	0.2762	0.1312	0.2052	115578	0.12	0.3516	0.0689	0.9958	D	53.238	0.0554	5.52	5.19	10.21	4.66
3	218	0.07%	23.3	50	80	25	0.1385	0.0891	0.1003	38372	0.09	0.1655	0.0270	0.9957	D	40.685	0.0664	2.77	3.40	9.29	3.46
4	213	0.07%	23.3	50	80	48	0.1990	0.1108	0.1340	63740	0.10	0.2431	0.0417	0.9952	D	45.506	0.0586	3.98	4.37	9.60	4.17
5	209	0.20%	23.3	50	80	186	0.2883	0.1339	0.3584	206016	0.21	0.4102	0.1029	0.995	D	48.468	0.0515	5.77	5.95	10.68	5.04
6	208	0.20%	23.3	50	80	186	0.3424	0.1445	0.3018	187230	0.16	0.4031	0.1029	0.9948	D	52.473	0.0504	6.85	6.52	10.59	5.30
7	187	0.03%	22.4	50	80	22	0.1160	0.0792	0.1054	34959	0.10	0.2102	0.0248	0.9931	A	39.947	0.0742	2.32	2.90	9.46	3.01
8	205	0.20%	23.3	50	80	104	0.2235	0.1180	0.2585	130955	0.17	0.2746	0.0698	0.9925	D	45.117	0.0550	4.47	4.95	10.29	4.53
9	210	0.07%	23.3	50	80	186	0.2989	0.1361	0.3457	202030	0.20	0.6424	0.1029	0.9918	A	49.469	0.0514	5.98	6.04	10.66	5.09
10	206	0.20%	23.3	50	80	104	0.1809	0.1050	0.3191	143859	0.23	0.2997	0.0698	0.9913	A	45.365	0.0617	3.62	3.99	10.63	3.91
11	198	0.10%	23.3	50	80	12	0.0964	0.0696	0.0692	20656	0.07	0.0974	0.0165	0.9912	D	36.946	0.0799	1.93	2.61	9.01	2.71
12	211	0.07%	23.3	50	80	186	0.4264	0.1576	0.2423	163953	0.12	0.6280	0.1029	0.9906	D	60.04	0.0500	8.53	7.10	10.45	5.54
13	192	0.03%	22.4	50	80	130	0.2497	0.1249	0.2892	151289	0.18	0.6525	0.0810	0.9899	A	45.81	0.0530	4.99	5.45	10.41	4.80
14	200	0.10%	23.3	50	80	44	0.1775	0.1038	0.1377	61375	0.10	0.2005	0.0393	0.9882	D	44.275	0.0611	3.55	4.01	9.64	3.93
15	199	0.10%	23.3	50	80	44	0.2278	0.1192	0.1073	54907	0.07	0.1893	0.0393	0.987	D	47.613	0.0564	4.56	4.78	9.36	4.43
16	207	0.20%	23.3	50	80	187	0.2450	0.1237	0.4240	225239	0.27	0.4246	0.1032	0.9865	A	45.93	0.0535	4.9	5.33	10.85	4.73
17	197	0.10%	23.3	50	80	12	0.1080	0.0754	0.0618	19990	0.06	0.0955	0.0165	0.9838	D	39.476	0.0776	2.16	2.73	8.90	2.85
18	216	0.07%	23.3	50	80	34	0.1621	0.0984	0.1165	49189	0.09	0.2042	0.0331	0.9838	D	45.098	0.0653	3.24	3.60	9.54	3.62
19	214	0.07%	23.3	50	80	48	0.1858	0.1066	0.1435	65675	0.11	0.2536	0.0417	0.983	A	46.759	0.0619	3.72	3.97	9.75	3.90
20	189	0.03%	22.4	50	80	63	0.1748	0.1029	0.2002	86249	0.15	0.3981	0.0500	0.9829	A	42.404	0.0598	3.5	4.12	10.00	4.01
21	201	0.10%	23.3	50	80	102	0.2472	0.1243	0.2293	122326	0.15	0.3489	0.0689	0.9828	A	48.319	0.0549	4.94	5.12	10.22	4.62
22	195	0.03%	22.4	50	80	9	0.0926	0.0676	0.0540	15278	0.06	0.1169	0.0137	0.9787	A	35.466	0.0794	1.85	2.61	8.68	2.71
23	217	0.07%	23.3	50	80	25	0.1443	0.0915	0.0962	37804	0.08	0.1641	0.0270	0.971	D	41.387	0.0656	2.89	3.49	9.24	3.53
24	215	0.07%	23.3	50	80	34	0.1572	0.0965	0.1202	49788	0.10	0.2007	0.0331	0.9709	A	42.679	0.0638	3.14	3.68	9.49	3.69

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u.
25	188	0.03%	22.4	50	80	22	0.1556	0.0959	0.0786	31549	0.06	0.1760	0.0248	0.962	D	37.359	0.0581	3.11	4.16	8.79	4.03
26	196	0.03%	22.4	50	80	9	0.1085	0.0757	0.0461	14601	0.04	0.1112	0.0137	0.9533	D	37.673	0.0738	2.17	2.88	8.45	2.99
27	190	0.03%	22.4	50	80	63	0.2374	0.1218	0.1474	75177	0.10	0.3821	0.0500	0.9247	A	49.585	0.0568	4.75	4.79	9.77	4.43
28	204	0.20%	23.3	50	80	103	0.3678	0.1488	0.1556	99408	0.08	0.2479	0.0694	0.9195	D	51.138	0.0485	7.36	7.19	9.79	5.58
29	191	0.03%	22.4	50	80	63	0.3083	0.1381	0.1135	65628	0.07	0.4397	0.0500	0.9083	D	78.206	0.0677	6.17	3.94	10.07	3.88
30	193	0.03%	22.4	50	80	130	0.3967	0.1534	0.1821	116909	0.09	0.5827	0.0810	0.9077	D	48.896	0.0463	7.93	8.11	9.92	5.92
31	194	0.03%	22.4	50	80	130	0.4729	0.1635	0.1527	104590	0.07	0.5009	0.0810	0.8734	D	35.546	0.0385	9.46	13.30	9.41	7.32
32	203	0.10%	23.3	50	80	102	0.4096	0.1552	0.1384	92207	0.07	0.3519	0.0689	0.7917	D	70.638	0.0555	8.19	5.80	10.04	4.97

Tab. 4-15: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 10

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u.
1	309	0.15%	27.6	70	28	26	0.1290	0.0852	0.1117	45904	0.10	0.1979	0.0277	0.9997	A	67.09	0.1237	1.84	1.92	10.76	1.85
2	319	0.04%	25.2	70	28	40	0.1499	0.0939	0.1477	62761	0.12	0.4147	0.0369	0.9993	A	68.73	0.1069	2.14	2.18	10.86	2.21
3	320	0.00%	25.2	70	28	40	0.1512	0.0944	0.1465	62570	0.12	0.0000	0.0369	0.9963	A	67.012	0.1022	2.16	2.26	10.75	2.30
4	310	0.15%	27.6	70	28	34	0.1613	0.0980	0.1171	55445	0.09	0.2005	0.0331	0.9992	D	67.816	0.0963	2.30	2.38	10.41	2.45
5	311	0.15%	27.5	70	28	47	0.1902	0.1080	0.1373	71416	0.10	0.2316	0.0411	0.9992	D	69.09	0.0847	2.72	2.75	10.43	2.86
6	321	0.20%	25.8	70	28	76	0.1903	0.1081	0.2217	110212	0.16	0.2880	0.0566	0.996	A	65.646	0.0807	2.72	2.90	10.86	3.01
7	312	0.34%	27.5	70	28	71	0.2182	0.1165	0.1808	101444	0.12	0.2062	0.0541	0.9985	D	63.447	0.0711	3.12	3.44	10.45	3.49
8	324	0.06%	22.5	70	28	112	0.2377	0.1219	0.2616	133902	0.17	0.5333	0.0734	0.9983	A	61.554	0.0659	3.40	3.86	10.75	3.82
9	313	0.34%	26.3	70	28	99	0.2470	0.1242	0.2227	128976	0.14	0.2469	0.0676	0.9985	D	62.284	0.0651	3.53	3.97	10.57	3.90
10	322	0.06%	22.5	70	28	144	0.2735	0.1306	0.2925	160406	0.18	0.5919	0.0867	0.9989	A	57.099	0.0581	3.91	4.79	10.70	4.43
11	314	0.34%	26.3	70	28	126	0.2797	0.1320	0.2503	154016	0.15	0.2718	0.0793	0.9994	D	57.895	0.0581	4.00	4.83	10.54	4.46
12	323	0.06%	22.5	70	28	161	0.2894	0.1341	0.3091	174079	0.18	0.6170	0.0934	0.9984	A	53.801	0.0546	4.13	5.38	10.67	4.76
13	315	0.52%	26.3	70	28	136	0.3120	0.1388	0.2422	156702	0.13	0.2341	0.0835	0.9965	D	56.132	0.0544	4.46	5.56	10.44	4.85
14	316	0.52%	26.3	70	28	172	0.3384	0.1438	0.2824	189290	0.15	0.2614	0.0976	0.9991	D	50.843	0.0499	4.83	6.65	10.45	5.36
15	317	0.52%	26.3	70	28	165	0.3715	0.1494	0.2468	171899	0.13	0.2464	0.0950	0.9965	D	50.354	0.0481	5.31	7.38	10.32	5.65
16	318	0.52%	26.3	70	28	171	0.4031	0.1543	0.2357	169538	0.12	0.2514	0.0973	0.9991	D	52.288	0.0476	5.76	7.71	10.31	5.78

Tab. 4-16: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 11

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
1	378	0.02%	24.4	70	42	46	0.1847	0.1062	0.1383	65036	0.10	0.4788	0.0405	0.9988	A	67.44	0.0847	2.64	2.74	10.42	2.85
2	356	0.07%	25.3	70	42	19	0.1916	0.1085	0.0551	27105	0.04	0.1458	0.0225	0.9705	D	58.674	0.0725	2.74	3.27	9.05	3.35
3	357	0.03%	26	70	42	41	0.1979	0.1105	0.1151	58780	0.08	0.3996	0.0375	0.9916	A	67.552	0.0803	2.83	2.93	10.14	3.04
4	358	0.03%	26.4	70	42	41	0.2034	0.1122	0.1119	58698	0.08	0.5557	0.0375	0.973	A	99.021	0.1206	2.91	2.05	11.04	2.04
5	372	0.20%	24.3	70	42	80	0.2082	0.1136	0.2134	107012	0.15	0.2901	0.0586	1	A	66.947	0.0767	2.97	3.11	10.77	3.21
6	361	0.11%	23.2	70	42	81	0.2241	0.1182	0.2008	101590	0.13	0.3595	0.0591	0.9992	A	68.402	0.0743	3.2	3.28	10.68	3.36
7	371	0.20%	24.2	70	42	80	0.2318	0.1203	0.1918	101500	0.13	0.2764	0.0586	0.9997	D	67.695	0.0720	3.31	3.42	10.59	3.48
8	369	0.20%	25	70	42	113	0.2350	0.1211	0.2671	145574	0.17	0.3623	0.0738	0.9993	A	68.86	0.0724	3.36	3.41	10.97	3.47
9	360	0.03%	23	70	42	60	0.2403	0.1225	0.1387	72367	0.09	0.5012	0.0484	0.9939	A	70.429	0.0727	3.43	3.41	10.27	3.47
10	363	0.11%	23.6	70	42	119	0.2525	0.1256	0.2618	142377	0.16	0.4594	0.0764	0.9994	A	68.255	0.0688	3.61	3.70	10.89	3.70
11	366	0.11%	24.2	70	42	136	0.2623	0.1280	0.2879	162236	0.18	0.5153	0.0835	0.9968	A	71.05	0.0692	3.75	3.69	11.04	3.69
12	374	0.20%	24.4	70	42	150	0.2740	0.1307	0.3041	175934	0.18	0.4295	0.0891	0.9979	A	71.099	0.0675	3.91	3.85	11.07	3.82
13	370	0.20%	25.4	70	42	113	0.2789	0.1318	0.2251	134985	0.13	0.3431	0.0738	0.9977	D	72.004	0.0675	3.98	3.87	10.76	3.83
14	362	0.11%	23.4	70	42	81	0.2951	0.1353	0.1525	88849	0.09	0.3531	0.0591	0.997	D	82.776	0.0726	4.22	3.56	10.53	3.60
15	367	0.11%	24.5	70	42	170	0.2979	0.1359	0.3170	191206	0.18	0.6014	0.0969	0.9975	A	74.668	0.0667	4.26	3.99	11.15	3.91
16	373	0.20%	24.4	70	42	150	0.3087	0.1381	0.2699	165006	0.15	0.3934	0.0891	0.9968	D	66.413	0.0605	4.41	4.65	10.78	4.35
17	365	0.11%	24	70	42	136	0.3340	0.1430	0.2262	141566	0.12	0.4934	0.0835	0.9973	D	79.622	0.0657	4.77	4.19	10.83	4.06
18	364	0.11%	23.8	70	42	119	0.3466	0.1452	0.1907	120580	0.10	0.4494	0.0764	0.9968	D	84.082	0.0669	4.95	4.12	10.71	4.01
19	375	0.02%	24.4	70	42	79	0.3475	0.1454	0.1263	81270	0.07	0.6567	0.0581	0.9984	A	93.463	0.0722	4.96	3.72	10.43	3.71
20	379	0.11%	25.4	70	42	123	0.3525	0.1463	0.1939	128971	0.10	0.4564	0.0781	0.9987	D	81.983	0.0652	5.04	4.30	10.69	4.13
21	359	0.03%	22.8	70	42	60	0.3554	0.1468	0.0938	58280	0.05	0.5686	0.0484	0.9951	A	115.59	0.0847	5.08	3.07	10.46	3.18
22	380	0.11%	23.8	70	42	146	0.3789	0.1506	0.2141	140358	0.11	0.5079	0.0875	0.9975	D	81.483	0.0626	5.41	4.65	10.76	4.35
23	377	0.02%	24.4	70	42	79	0.3794	0.1507	0.1157	77151	0.06	0.7033	0.0581	0.9996	A	110.99	0.0783	5.42	3.42	10.57	3.48
24	353	0.03%	25.3	70	42	79	0.4087	0.1551	0.1074	75559	0.05	0.6772	0.0581	0.9885	D	119.52	0.0792	5.84	3.42	10.56	3.48

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/Ψ	M	U/u*
25	368	0.11%	24.7	70	42	169	0.4122	0.1556	0.2278	158152	0.11	0.5535	0.0965	0.9992	D	82.814	0.0608	5.89	4.98	10.83	4.54
26	354	0.03%	24.8	70	42	79	0.4209	0.1568	0.1043	73177	0.05	0.7068	0.0581	0.987	D	130.02	0.0833	6.01	3.24	10.72	3.32
27	376	0.02%	24.4	70	42	79	0.4237	0.1572	0.1036	72076	0.05	0.7456	0.0581	0.9896	A	131.6	0.0838	6.05	3.22	10.67	3.31
28	355	0.03%	25.3	70	42	79	0.4269	0.1577	0.1028	73532	0.05	0.7278	0.0581	0.9866	A	136.82	0.0862	6.1	3.12	10.74	3.22

Tab. 4-17: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 12

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
1	295	0.06%	27	70	56	16	0.1275	0.0845	0.0697	27963	0.06	0.1888	0.0200	0.9882	A	65.953	0.1220	1.82	1.93	10.19	1.87
2	296	0.06%	27	70	56	33	0.1629	0.0987	0.1125	52729	0.09	0.2665	0.0325	0.9884	A	67.066	0.0943	2.33	2.43	10.33	2.51
3	297	0.06%	27	70	56	33	0.1918	0.1085	0.0956	49288	0.07	0.2460	0.0325	0.9731	D	69.614	0.0848	2.74	2.76	10.03	2.87
4	298	0.25%	27	70	56	70	0.2153	0.1157	0.1807	99291	0.12	0.2380	0.0536	0.987	D	66.961	0.0750	3.08	3.21	10.55	3.30
5	299	0.25%	27	70	56	70	0.2435	0.1234	0.1597	93601	0.10	0.2261	0.0536	0.9875	D	67.876	0.0700	3.48	3.59	10.35	3.61
6	300	0.25%	27	70	56	107	0.2747	0.1309	0.2165	134585	0.13	0.3021	0.0712	0.9995	D	70.736	0.0672	3.92	3.88	10.69	3.84
7	301	0.43%	27	70	56	125	0.2989	0.1361	0.2324	150295	0.13	0.2683	0.0789	0.9988	D	71.636	0.0648	4.27	4.17	10.76	4.04
8	302	0.43%	27	70	56	124	0.3285	0.1420	0.2097	141450	0.11	0.2620	0.0785	0.9993	D	74.385	0.0633	4.69	4.42	10.66	4.20
9	303	0.61%	27.8	70	56	158	0.3511	0.1460	0.2501	177266	0.13	0.2705	0.0923	0.9989	D	74.919	0.0617	5.02	4.69	10.85	4.37
10	304	0.25%	25.9	70	56	26	0.1289	0.0851	0.1120	43945	0.10	0.1623	0.0277	0.9926	A	65.513	0.1191	1.84	1.97	10.67	1.91
11	305	0.07%	25.9	70	56	33	0.1496	0.0936	0.1225	52875	0.10	0.2756	0.0325	0.9927	A	64.99	0.0993	2.14	2.30	10.48	2.36
12	306	0.07%	25.9	70	56	55	0.2252	0.1185	0.1357	74123	0.09	0.3340	0.0457	0.9896	A	71.02	0.0765	3.22	3.17	10.31	3.26
13	307	0.43%	25.9	70	56	164	0.3741	0.1498	0.2436	168313	0.12	0.3208	0.0946	0.9963	D	79.568	0.0621	5.34	4.70	10.88	4.38
14	308	0.43%	25.9	70	56	163	0.4069	0.1549	0.2226	158925	0.11	0.2771	0.0942	0.9943	D	61.566	0.0516	5.81	6.61	10.41	5.34

Tab. 4-18: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 13

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u _*
1	325	0.07%	25.3	70	84	25	0.1241	0.0831	0.1116	42059	0.10	0.2431	0.0270	0.9834	A	60.508	0.1117	1.77	2.05	10.50	2.03
2	337	0.34%	25.8	70	84	42	0.1537	0.0951	0.1519	66463	0.12	0.1648	0.0381	0.9782	D	60.376	0.0887	2.2	2.55	10.48	2.64
3	327	0.07%	25.3	70	84	49	0.1544	0.0956	0.1757	76240	0.14	0.3592	0.0423	0.9781	A	64.29	0.0949	2.21	2.40	10.80	2.48
4	346	0.70%	26.9	70	84	25	0.1559	0.0959	0.0892	40561	0.07	0.0933	0.0270	0.9696	D	62.545	0.0939	2.23	2.49	10.03	2.58
5	348	0.05%	26.7	70	84	24	0.1733	0.1024	0.0769	37109	0.06	0.2060	0.0263	0.9755	D	59.714	0.0793	2.48	2.90	9.56	3.01
6	328	0.07%	27.5	70	84	53	0.1791	0.1044	0.1643	82585	0.12	0.3555	0.0445	0.9936	A	67.1	0.0865	2.56	2.67	10.63	2.78
7	338	0.34%	26	70	84	42	0.1808	0.1049	0.1291	62627	0.09	0.1528	0.0381	0.7116	D	62.006	0.0797	2.58	2.92	10.19	3.03
8	326	0.07%	25.3	70	84	24	0.1871	0.1070	0.0713	34595	0.05	0.1963	0.0263	0.9778	D	70.07	0.0871	2.67	2.67	9.74	2.78
9	329	0.07%	25.3	70	84	19	0.1916	0.1085	0.0551	27105	0.04	0.1458	0.0225	0.9705	D	58.671	0.0725	2.74	3.27	9.05	3.35
10	345	0.70%	26.2	70	84	76	0.1981	0.1104	0.2135	109606	0.14	0.1766	0.0566	0.9705	D	64.202	0.0774	2.83	3.08	10.75	3.19
11	339	0.34%	26.1	70	84	68	0.2010	0.1114	0.1880	97109	0.13	0.2094	0.0526	0.9791	D	64.566	0.0763	2.87	3.11	10.58	3.21
12	331	0.07%	25.5	70	84	69	0.2034	0.1122	0.1884	96385	0.13	0.4112	0.0531	0.9828	A	68.679	0.0799	2.91	2.96	10.70	3.07
13	340	0.34%	26.2	70	84	71	0.2225	0.1177	0.1773	97037	0.12	0.2040	0.0541	0.9799	D	63.744	0.0705	3.18	3.49	10.42	3.54
14	349	0.05%	27.2	70	84	43	0.2255	0.1186	0.1059	60000	0.07	0.3021	0.0387	0.9906	D	68.12	0.0737	3.22	3.31	9.95	3.39
15	330	0.07%	25.4	70	84	68	0.2268	0.1189	0.1666	90093	0.11	0.3861	0.0526	0.9902	A	69.779	0.0749	3.24	3.25	10.49	3.33
16	341	0.34%	26.5	70	84	110	0.2442	0.1235	0.2503	144911	0.16	0.2800	0.0725	0.9881	D	67.534	0.0696	3.49	3.62	10.84	3.64
17	344	0.70%	25.9	70	84	134	0.2487	0.1246	0.2997	172182	0.18	0.2470	0.0827	0.9704	D	67.738	0.0693	3.55	3.67	11.04	3.68
18	332	0.07%	25.5	70	84	91	0.2615	0.1278	0.1934	112708	0.12	0.4794	0.0639	0.9861	A	76.156	0.0733	3.74	3.43	10.72	3.49
19	342	0.34%	27	70	84	110	0.2618	0.1279	0.2335	141839	0.14	0.2776	0.0725	0.9897	D	70.238	0.0688	3.74	3.73	10.79	3.72
20	350	0.20%	27.2	70	84	130	0.2708	0.1300	0.2667	165622	0.16	0.3824	0.0810	0.9883	D	70.839	0.0678	3.87	3.82	10.93	3.79
21	343	0.34%	27.4	70	84	110	0.2813	0.1323	0.2173	138124	0.13	0.2724	0.0725	0.9897	D	71.821	0.0671	4.02	3.92	10.71	3.86
22	347	0.20%	27.5	70	84	163	0.2859	0.1334	0.3167	203438	0.19	0.4541	0.0942	0.9745	A	72.799	0.0670	4.08	3.93	11.13	3.87
23	334	0.07%	26.4	70	84	130	0.2879	0.1338	0.2509	156902	0.15	0.6084	0.0810	0.9776	A	75.235	0.0685	4.11	3.83	10.93	3.80
24	335	0.07%	26.4	70	84	139	0.3206	0.1405	0.2409	158157	0.14	0.6122	0.0847	0.9836	A	75.225	0.0645	4.58	4.26	10.83	4.10

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u.
25	336	0.07%	26.4	70	84	155	0.3623	0.1479	0.2377	164344	0.13	0.6675	0.0911	0.9872	A	81.731	0.0641	5.18	4.43	10.89	4.21
26	333	0.07%	26.4	70	84	90	0.4028	0.1543	0.1241	89512	0.06	0.4392	0.0634	0.9948	D	93.416	0.0665	5.75	4.31	10.33	4.13

Tab. 4-19: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 14

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u _*
1	459	0.07%	23.2	25	15	15	0.0696	0.0545	0.1196	27899	0.14	0.1033	0.0192	1	A	19.367	0.0569	2.78	3.59	8.62	3.62
2	450	0.20%	25.3	25	15	20	0.0787	0.0599	0.1411	38328	0.15	0.0889	0.0233	0.9998	A	22.272	0.0586	3.15	3.54	8.96	3.57
3	456	0.27%	25.3	25	15	60	0.1053	0.0742	0.3161	106350	0.30	0.1346	0.0484	0.9996	A	15.901	0.0411	4.21	6.62	9.30	5.35
4	449	0.05%	24.8	25	15	20	0.0783	0.0597	0.1417	37842	0.16	0.1336	0.0233	0.9993	A	18.95	0.0523	3.13	4.13	8.71	4.01
5	432	0.16%	25.5	25	15	85	0.1423	0.0907	0.3318	137248	0.27	0.1851	0.0610	0.9989	A	13.683	0.0349	5.69	10.40	9.20	6.62
6	454	0.05%	24.8	25	15	60	0.1277	0.0846	0.2609	98697	0.23	0.2421	0.0484	0.9985	A	17.73	0.0405	5.11	7.21	9.18	5.59
7	437	0.16%	26.5	25	15	120	0.1673	0.1002	0.3985	187198	0.31	0.2335	0.0768	0.9985	A	14.097	0.0339	6.69	11.87	9.46	7.00
8	458	0.52%	22.9	25	15	20	0.0673	0.0530	0.1652	37172	0.18	0.0741	0.0233	0.9983	D	24.589	0.0715	2.69	2.74	9.47	2.85
9	455	0.05%	25.1	25	15	60	0.1193	0.0808	0.2790	101747	0.26	0.2531	0.0484	0.9971	A	18.654	0.0430	4.77	6.40	9.35	5.25
10	431	0.16%	25.3	25	15	85	0.1500	0.0938	0.3148	133873	0.25	0.1821	0.0610	0.9971	D	13.401	0.0341	6	11.19	9.12	6.83
11	457	0.42%	25.6	25	15	41	0.0859	0.0639	0.2653	77543	0.26	0.0963	0.0375	0.9966	D	16.939	0.0462	3.44	5.07	9.21	4.59
12	445	0.16%	26.2	25	15	60	0.1422	0.0907	0.2344	98775	0.19	0.1424	0.0484	0.9964	D	13.05	0.0342	5.69	10.90	8.76	6.76
13	438	0.06%	26.8	25	15	120	0.2032	0.1121	0.3281	173785	0.23	0.3215	0.0768	0.9963	A	14.297	0.0327	8.13	14.21	9.31	7.51
14	444	0.06%	26.7	25	15	155	0.2128	0.1150	0.4046	219204	0.28	0.4054	0.0911	0.996	A	16.235	0.0340	8.51	13.11	9.65	7.28
15	425	0.16%	25.5	25	15	51	0.1312	0.0861	0.2159	84748	0.19	0.1281	0.0434	0.9937	D	12.766	0.0346	5.25	10.28	8.63	6.59
16	436	0.16%	26.3	25	15	120	0.2293	0.1196	0.2907	162091	0.19	0.2255	0.0768	0.9929	D	14.92	0.0324	9.17	15.37	9.25	7.73
17	453	0.05%	26.7	25	15	20	0.0981	0.0705	0.1132	37602	0.11	0.1066	0.0233	0.9885	D	13.271	0.0384	3.93	7.39	7.90	5.66
18	440	0.06%	26.8	25	15	120	0.2472	0.1243	0.2696	158390	0.17	0.3257	0.0768	0.9855	D	16.671	0.0332	9.89	14.83	9.28	7.63
19	451	0.20%	25.8	25	15	20	0.0993	0.0710	0.1120	36577	0.11	0.0667	0.0233	0.9841	D	13.073	0.0380	3.97	7.59	7.87	5.73
20	446	0.16%	26.7	25	15	40	0.1466	0.0924	0.1516	66019	0.12	0.1014	0.0369	0.9828	D	10.674	0.0313	5.86	13.73	8.06	7.41
21	426	0.16%	25.8	25	15	51	0.1608	0.0978	0.1762	79299	0.14	0.1287	0.0434	0.9655	D	14.595	0.0348	6.43	11.02	8.57	6.79
22	424	0.16%	25.3	25	15	30	0.1256	0.0836	0.1327	50325	0.12	0.0966	0.0305	0.9528	D	15.968	0.0389	5.02	7.86	8.31	5.83
23	433	0.16%	25.7	25	15	85	0.2292	0.1196	0.2061	112993	0.14	0.1982	0.0610	0.9497	D	22.761	0.0383	9.17	10.07	9.24	6.53
24	427	0.16%	26.1	25	15	51	0.1968	0.1101	0.1440	73500	0.10	0.1350	0.0434	0.8931	D	19.386	0.0373	7.87	10.15	8.65	6.56

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u.
25	452	0.20%	26.3	25	15	20	0.1244	0.0831	0.0893	34589	0.08	0.0617	0.0233	0.8875	D	11.652	0.0337	4.97	10.67	7.49	6.70
26	428	0.16%	26.3	25	15	51	0.2330	0.1206	0.1216	68361	0.08	0.1568	0.0434	0.7082	D	33.963	0.0461	9.32	6.86	9.07	5.45
27	447	0.16%	27.6	25	15	20	0.1419	0.0905	0.0783	34224	0.06	0.0579	0.0233	0.6537	D	6.8754	0.0269	5.68	20.64	6.89	8.56
28	460	0.08%	25.7	25	15	15	0.1467	0.09	0.0568	24084	0.05	0.0795	0.0192	0.5673	D	19.229	0.0403	5.87	7.63	7.51	5.75
29	443	0.06%	25.4	25	15	20	0.2074	0.1133	0.0536	27626	0.04	0.1625	0.0233	0.5383	D	67.937	0.0781	8.29	3.05	9.25	3.16
30	448	0.16%	28.1	25	15	10	0.1376	0.0887	0.0404	17538	0.03	0.0793	0.0147	-0.01	D	53.093	0.0869	5.5	2.59	8.86	2.69
31	442	0.06%	26.8	25	15	85	0.2748	0.1309	0.1718	106298	0.10	0.3061	0.0610	0.9969	D	33.424	0.0433	11	8.22	9.42	5.96
32	429	0.16%	26.6	25	15	51	0.2778	0.1316	0.1020	63075	0.06	0.1877	0.0434	0.9903	D	59.506	0.0593	11.1	4.67	9.56	4.36
33	439	0.06%	26.8	25	15	120	0.2799	0.1321	0.2382	148628	0.14	0.3625	0.0768	0.9998	D	25.378	0.0381	11.2	11.03	9.54	6.79
34	434	0.16%	25.9	25	15	85	0.2869	0.1336	0.1646	101389	0.10	0.2167	0.0610	0.9921	D	34.418	0.0433	11.5	8.34	9.40	6.00
35	435	0.16%	26.1	25	15	120	0.3010	0.1366	0.2215	140240	0.13	0.2583	0.0768	0.9976	D	27.893	0.0388	12	10.79	9.52	6.73
36	430	0.16%	27	25	15	85	0.3163	0.1396	0.1493	99050	0.08	0.2255	0.0610	0.9853	D	41.056	0.0457	12.7	7.70	9.48	5.77
37	441	0.06%	26.8	25	15	120	0.3446	0.1449	0.1935	132451	0.10	0.3954	0.0768	0.9957	D	37.18	0.0425	13.8	9.27	9.71	6.30

Tab. 4-20: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 15

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m ³ /h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u _*
1	493	0.10%	25.5	25	22.5	15	0.0688	0.0540	0.1210	29797	0.14	0.0932	0.0192	0.9985	A	20.383	0.0596	2.75	3.37	8.72	3.44
2	492	0.10%	25	25	22.5	31	0.0926	0.0676	0.1858	56527	0.19	0.1380	0.0312	0.9996	A	20.853	0.0512	3.7	4.44	9.09	4.22
3	491	0.10%	24.5	25	22.5	60	0.1242	0.0831	0.2680	98780	0.24	0.2069	0.0484	0.998	A	22.21	0.0465	4.97	5.59	9.51	4.87
4	505	0.03%	22.6	25	22.5	15	0.1358	0.0880	0.0613	22735	0.05	0.1039	0.0192	0.682	D	15.972	0.0378	5.43	8.50	7.39	6.05
5	480	0.04%	26.6	25	22.5	30	0.1406	0.0900	0.1185	50133	0.10	0.1749	0.0305	0.9863	A	21.476	0.0434	5.62	6.55	8.51	5.31
6	490	0.08%	24	25	22.5	60	0.1570	0.0964	0.2123	89610	0.17	0.2189	0.0484	0.9987	A	23.116	0.0434	6.28	6.79	9.26	5.42
7	495	0.00%	23.9	25	22.5	151	0.1863	0.1068	0.4497	209699	0.33	0.0000	0.0895	0.9975	A	23.498	0.0415	7.45	7.93	10.14	5.86
8	489	0.10%	23.8	25	22.5	90	0.1985	0.1107	0.2519	121310	0.18	0.2522	0.0634	0.9981	D	22.92	0.0400	7.94	8.66	9.45	6.11
9	503	0.10%	21.1	25	22.5	50	0.1987	0.1107	0.1398	62514	0.10	0.1444	0.0428	0.9965	D	15.3	0.0337	7.95	12.99	8.39	7.25
10	479	0.04%	23.1	25	22.5	60	0.2095	0.1140	0.1591	77428	0.11	0.2741	0.0484	0.9863	D	23.567	0.0399	8.38	8.89	8.95	6.18
11	483	0.08%	23.2	25	22.5	90	0.2120	0.1147	0.2358	115834	0.16	0.2799	0.0634	0.9936	D	23.735	0.0399	8.48	8.93	9.42	6.19
12	481	0.08%	24	25	22.5	60	0.2202	0.1171	0.1514	77577	0.10	0.2042	0.0484	0.9713	D	23.059	0.0392	8.81	9.55	8.88	6.38
13	482	0.08%	22.8	25	22.5	60	0.2220	0.1176	0.1502	74761	0.10	0.1946	0.0484	0.992	D	20.171	0.0367	8.88	11.00	8.72	6.78
14	504	0.10%	21.8	25	22.5	61	0.2335	0.1207	0.1451	72161	0.10	0.1824	0.0489	0.9624	D	23.113	0.0383	9.34	10.10	8.83	6.54
15	488	0.10%	23.6	25	22.5	120	0.2376	0.1218	0.2805	147952	0.18	0.3126	0.0768	0.9954	D	25.368	0.0398	9.51	9.37	9.70	6.33
16	484	0.08%	23.6	25	22.5	121	0.2546	0.1261	0.2640	144164	0.17	0.3407	0.0772	0.9979	D	24.247	0.0383	10.2	10.50	9.60	6.65
17	486	0.10%	24.2	25	22.5	151	0.2752	0.1310	0.3049	175749	0.18	0.3801	0.0895	0.9943	D	29.115	0.0406	11	9.45	9.95	6.35
18	485	0.08%	23.7	25	22.5	151	0.2848	0.1331	0.2945	170211	0.18	0.4113	0.0895	0.9962	A	27.027	0.0389	11.4	10.54	9.84	6.66
19	478	0.04%	22.8	25	22.5	91	0.2957	0.1355	0.1710	98065	0.10	0.3706	0.0639	0.9812	D	27.488	0.0388	11.8	10.76	9.25	6.72
20	502	0.00%	25.1	25	22.5	180	0.3056	0.1375	0.3272	202982	0.19	0.0000	0.1006	0.9963	A	27.428	0.0385	12.2	11.14	9.99	6.82
21	487	0.10%	24.8	25	22.5	180	0.3067	0.1377	0.3261	200931	0.19	0.4199	0.1006	0.9994	D	27.67	0.0386	12.3	11.08	9.99	6.80
22	497	0.00%	24	25	22.5	131	0.3113	0.1386	0.2338	141879	0.13	0.0000	0.0814	0.9678	A	23.984	0.0363	12.5	12.98	9.44	7.25
23	501	0.00%	24.6	25	22.5	90	0.3207	0.1405	0.1559	97455	0.09	0.0000	0.0634	0.6413	A	20.435	0.0340	12.8	15.70	8.90	7.79
24	500	0.00%	24.3	25	22.5	59	0.3254	0.1414	0.1007	62845	0.06	0.0000	0.0478	0.2789	A	27.088	0.0377	13	12.01	8.65	7.03

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/Ψ	M	U/u*
25	498	0.00%	24	25	22.5	131	0.3269	0.1417	0.2226	138033	0.12	0.0000	0.0814	0.9355	A	27.669	0.0380	13.1	11.82	9.53	6.98
26	496	0.00%	24.1	25	22.5	150	0.3380	0.1437	0.2465	155503	0.14	0.0000	0.0891	0.9774	A	25.167	0.0364	13.5	13.43	9.62	7.35
27	499	0.00%	24	25	22.5	131	0.3476	0.1454	0.2094	133252	0.11	0.0000	0.0814	0.9041	A	23.344	0.0351	13.9	14.89	9.33	7.64
28	477	0.04%	22.4	25	22.5	121	0.3643	0.1483	0.1845	114563	0.10	0.4452	0.0772	0.9908	D	27.108	0.0368	14.6	13.44	9.31	7.35
29	494	0.10%	26	25	22.5	168	0.3931	0.1528	0.2374	167756	0.12	0.3594	0.0961	0.9721	D	23.692	0.0344	15.7	16.59	9.49	7.95

Tab. 4-21: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 16

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u*
1	404	0.03%	27.9	25	30	7	0.0556	0.0455	0.0698	15482	0.09	0.0927	0.0116	0.9899	A	19.553	0.0675	2.22	2.84	8.16	2.96
2	405	0.03%	28.2	25	30	5	0.0656	0.0519	0.0424	10799	0.05	0.0735	0.0092	0.8417	A	22.352	0.0667	2.62	2.93	7.73	3.04
3	406	0.03%	26.3	25	30	10	0.0732	0.0566	0.0759	20035	0.09	0.1001	0.0147	0.9796	A	18.341	0.0529	2.93	3.99	7.96	3.91
4	388	0.20%	26	25	30	30	0.0862	0.0641	0.1933	57299	0.20	0.1035	0.0305	0.9955	A	18.515	0.0489	3.45	4.66	8.98	4.35
5	387	0.20%	25.4	25	30	30	0.0970	0.0698	0.1719	54628	0.17	0.0986	0.0305	0.9928	D	18.016	0.0455	3.88	5.38	8.77	4.76
6	407	0.03%	26.6	25	30	10	0.0980	0.0704	0.0567	18755	0.06	0.0934	0.0147	0.8237	D	19.673	0.0478	3.92	4.98	7.60	4.54
7	382	0.07%	24.8	25	30	30	0.0996	0.0712	0.1673	53324	0.17	0.1460	0.0305	0.9927	A	18.894	0.0464	3.98	5.27	8.80	4.70
8	381	0.07%	23.3	25	30	30	0.1223	0.0821	0.1363	48053	0.12	0.1368	0.0305	0.9856	D	18.549	0.0422	4.89	6.59	8.50	5.33
9	389	0.20%	26	25	30	61	0.1249	0.0833	0.2713	104482	0.24	0.1516	0.0489	0.991	A	18.409	0.0418	5	6.79	9.28	5.42
10	385	0.07%	23.3	25	30	71	0.1520	0.0945	0.2594	105298	0.21	0.2541	0.0541	0.9959	A	21.228	0.0420	6.08	7.16	9.39	5.57
11	383	0.07%	23.3	25	30	50	0.1524	0.0947	0.1823	74090	0.15	0.1985	0.0428	0.988	A	22.013	0.0427	6.1	6.92	9.03	5.47
12	393	0.34%	26.8	25	30	85	0.1542	0.0954	0.3063	138020	0.24	0.1544	0.0610	0.9893	D	18.98	0.0395	6.17	8.13	9.45	5.93
13	392	0.20%	26.4	25	30	85	0.1604	0.0977	0.2944	134465	0.23	0.1853	0.0610	0.9936	D	19.638	0.0397	6.42	8.17	9.44	5.94
14	396	0.34%	26.3	25	30	121	0.1695	0.1010	0.3967	186775	0.30	0.2013	0.0772	0.9957	D	20.897	0.0402	6.78	8.11	9.85	5.92
15	390	0.20%	26	25	30	61	0.1812	0.1051	0.1870	90841	0.14	0.1433	0.0489	0.983	D	19.937	0.0385	7.25	9.09	8.95	6.24
16	397	0.34%	26.5	25	30	155	0.1923	0.1087	0.4479	228154	0.32	0.2388	0.0911	0.9954	D	21.898	0.0395	7.69	8.78	10.04	6.14
17	411	0.07%	24.2	25	30	90	0.2031	0.1121	0.2461	121401	0.17	0.2938	0.0634	0.9952	A	23.059	0.0398	8.13	8.81	9.44	6.15
18	386	0.07%	23.3	25	30	71	0.2044	0.1125	0.1929	93158	0.14	0.2356	0.0541	0.9823	D	20.797	0.0380	8.18	9.83	9.03	6.46
19	391	0.20%	26.2	25	30	85	0.2134	0.1151	0.2212	118430	0.15	0.1825	0.0610	0.9899	D	22.48	0.0388	8.54	9.49	9.29	6.37
20	394	0.34%	27.3	25	30	85	0.2170	0.1162	0.2176	121084	0.14	0.1502	0.0610	0.9758	D	21.64	0.0380	8.68	10.03	9.24	6.52
21	395	0.34%	25.8	25	30	121	0.2193	0.1168	0.3066	164691	0.20	0.1941	0.0772	0.9938	D	22.006	0.0382	8.77	9.96	9.63	6.50
22	423	0.15%	26.6	25	30	60	0.23	0.12	0.15	81617	0.10	0.1573	0.0484	0.9095	D	23.905	0.0391	9.2	9.62	8.86	6.40
23	424	0.15%	26.6	25	30	60	0.23	0.12	0.15	81616	0.10	0.1453	0.0484	0.9084	D	12.325	0.0349	9.2	18.65	8.86	8.47
24	415	0.07%	24.8	25	30	80	0.2327	0.1205	0.1910	102995	0.13	0.2948	0.0586	0.9747	D	32.905	0.0453	9.31	7.07	9.54	5.53

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/Ψ	M	U/u.
25	420	0.15%	25.8	25	30	100	0.23	0.12	0.24	131970	0.15	0.2456	0.0680	0.9882	D	29.914	0.0432	9.36	7.82	9.69	5.82
26	403	0.03%	27.5	25	30	120	0.2514	0.1254	0.2652	160073	0.17	0.5110	0.0768	0.987	A	26.274	0.0398	10.1	9.57	9.65	6.39
27	418	0.07%	25.4	25	30	120	0.25	0.13	0.26	150719	0.17	0.3646	0.0768	0.9885	A	26.329	0.0397	10.1	9.61	9.65	6.40
28	416	0.07%	25	25	30	80	0.2548	0.1262	0.1744	99026	0.11	0.3021	0.0586	0.9981	D	37.231	0.0468	10.2	6.84	9.58	5.44
29	421	0.15%	26	25	30	100	0.26	0.13	0.21	126177	0.13	0.2452	0.0680	0.9983	D	31.863	0.0431	10.4	8.13	9.64	5.93
30	398	0.34%	26.8	25	30	154	0.2696	0.1297	0.3173	194513	0.19	0.2379	0.0907	0.9997	D	27.136	0.0396	10.8	9.94	9.92	6.49
31	417	0.07%	25.2	25	30	80	0.2742	0.13	0.1621	95879	0.10	0.3174	0.0586	0.9981	D	44.163	0.0499	11	6.21	9.70	5.16
32	419	0.07%	25.6	25	30	120	0.28	0.13	0.24	144366	0.14	0.3944	0.0768	0.9996	D	34.694	0.0439	11.1	8.01	9.86	5.89
33	422	0.15%	26.3	25	30	100	0.28	0.13	0.20	122359	0.12	0.2517	0.0680	0.9985	D	35.967	0.0446	11.2	7.76	9.69	5.80
34	412	0.07%	24.6	25	30	159	0.3009	0.1366	0.2935	178358	0.17	0.4771	0.0927	0.999	A	32.686	0.0417	12	9.21	10.03	6.28
35	384	0.07%	23.3	25	30	50	0.3016	0.1367	0.0921	54052	0.05	0.2803	0.0428	0.9732	D	77.102	0.0679	12.1	3.91	9.83	3.86
36	402	0.03%	27	25	30	120	0.3231	0.1409	0.2064	138181	0.12	0.5451	0.0768	0.9961	A	36.667	0.0430	12.9	8.81	9.76	6.15
37	414	0.07%	25.4	25	30	118	0.3237	0.1411	0.2025	129929	0.11	0.4047	0.0759	0.9991	D	41.859	0.0458	12.9	7.73	9.88	5.79
38	409	0.03%	27.1	25	30	60	0.3256	0.1414	0.1024	68967	0.06	0.3903	0.0484	0.9925	D	62.788	0.0570	13	5.19	9.59	4.66
39	413	0.07%	25	25	30	159	0.3319	0.1426	0.2661	170725	0.15	0.4873	0.0927	0.9966	D	36.838	0.0428	13.3	9.01	10.05	6.22
40	408	0.03%	26.9	25	30	70	0.3607	0.1477	0.1078	75435	0.06	0.4853	0.0536	0.9915	D	81.295	0.0640	14.4	4.44	9.99	4.21
41	401	0.03%	26.7	25	30	120	0.3641	0.1482	0.1831	127910	0.10	0.5831	0.0768	0.998	A	46.985	0.0467	14.6	7.75	9.90	5.79
42	400	0.03%	26.2	25	30	152	0.3656	0.1485	0.2310	159429	0.12	0.7024	0.0899	0.9987	A	44.542	0.0460	14.6	8.21	10.09	5.95
43	410	0.03%	27.3	25	30	90	0.3989	0.1537	0.1253	92269	0.06	0.5275	0.0634	0.9806	D	68.692	0.0551	16	5.81	9.88	4.98
44	399	0.34%	27.2	25	30	155	0.3989	0.1537	0.2159	158479	0.11	0.2576	0.0911	0.998	D	43.363	0.0437	16	9.20	9.96	6.28

Tab. 4-22: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 17

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u.
1	469	0.07%	26.5	25	45	15	0.0652	0.0518	0.1276	30971	0.16	0.0959	0.0192	0.9934	A	15.629	0.0503	2.61	4.17	8.36	4.04
2	468	0.07%	25.7	25	45	21	0.0732	0.0567	0.1591	41371	0.18	0.1130	0.0240	0.9934	A	15.087	0.0464	2.93	4.85	8.51	4.47
3	470	0.04%	24.8	25	45	20	0.0893	0.0658	0.1244	36627	0.13	0.1217	0.0233	0.9858	A	14.016	0.0408	3.57	6.37	8.08	5.24
4	471	0.04%	25	25	45	41	0.1094	0.0761	0.2081	71267	0.20	0.1948	0.0375	0.9917	A	14.506	0.0387	4.38	7.54	8.71	5.72
5	461	0.07%	24.2	25	45	51	0.1203	0.0812	0.2354	84177	0.21	0.1839	0.0434	0.9882	A	14.615	0.0377	4.81	8.23	8.86	5.96
6	467	0.07%	24.8	25	45	41	0.1530	0.0949	0.1489	63220	0.12	0.1489	0.0375	0.977	D	14.746	0.0353	6.12	10.38	8.36	6.62
7	473	0.04%	25.7	25	45	59	0.1927	0.1088	0.1701	84896	0.12	0.2373	0.0478	0.9725	D	16.728	0.0352	7.71	11.52	8.69	6.91
8	462	0.07%	24.6	25	45	51	0.2052	0.1127	0.1381	69246	0.10	0.1703	0.0434	0.9733	D	15.806	0.0339	8.21	12.98	8.38	7.25
9	464	0.07%	25	25	45	80	0.2113	0.1145	0.2104	108367	0.15	0.2664	0.0586	0.9856	D	23.434	0.0397	8.45	9.02	9.26	6.22
10	472	0.04%	25.3	25	45	49	0.2542	0.1260	0.1071	61229	0.07	0.2021	0.0423	0.795	D	18.1	0.0341	10.2	14.04	8.25	7.47
11	474	0.04%	23.7	25	45	79	0.2557	0.1264	0.1716	94182	0.11	0.3105	0.0581	0.9886	D	23.056	0.0374	10.2	11.09	9.03	6.81
12	463	0.07%	24.8	25	45	80	0.2802	0.1321	0.1586	93762	0.10	0.2898	0.0586	0.9391	D	35.594	0.0443	11.2	7.87	9.40	5.84
13	476	0.04%	24.2	25	45	120	0.3185	0.1401	0.2093	129020	0.12	0.4135	0.0768	0.9822	D	22.912	0.0355	12.7	13.90	9.33	7.44
14	475	0.04%	23.9	25	45	79	0.3202	0.1404	0.1370	83984	0.08	0.2966	0.0581	0.8829	D	22.624	0.0353	12.8	14.16	8.84	7.50
15	466	0.07%	24	25	45	80	0.3439	0.1448	0.1292	81879	0.07	0.3024	0.0586	0.9037	D	46.865	0.0475	13.8	7.34	9.47	5.64
16	465	0.02%	24	25	45	158	0.3455	0.1450	0.2540	161283	0.14	0.6863	0.0923	0.974	A	30.053	0.0388	13.8	11.50	9.77	6.91

Tab. 4-23: Dados Experimentais e Resultados do Modelo Matemático – Série 18

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u _*
1	533	0.10%	20.4	50	45	14	0.1195	0.0808	0.0651	20848	0.06	0.1287	0.0183	0.9922	D	55.073	0.1026	2.39	2.17	9.67	2.19
2	528	0.07%	18.6	50	45	15	0.1237	0.0828	0.0674	21005	0.06	0.1506	0.0192	0.9938	A	56.549	0.1020	2.47	2.19	9.72	2.21
3	518	0.08%	19.7	50	45	31	0.1274	0.0846	0.1348	44275	0.12	0.2473	0.0312	0.9937	A	56.6	0.0994	2.55	2.25	10.47	2.29
4	543	0.13%	20.8	50	45	24	0.1330	0.0868	0.1003	34861	0.09	0.1606	0.0263	0.9961	D	55.21	0.0919	2.66	2.41	9.99	2.49
5	527	0.04%	18.2	50	45	15	0.1399	0.0897	0.0596	19911	0.05	0.1700	0.0192	0.9837	D	54.576	0.0866	2.8	2.56	9.30	2.66
6	542	0.13%	22	50	45	30	0.1418	0.0905	0.1175	44039	0.10	0.1858	0.0305	0.9957	A	57.241	0.0900	2.84	2.48	10.17	2.57
7	534	0.10%	20.5	50	45	30	0.1487	0.0932	0.1121	41510	0.09	0.1926	0.0305	0.9971	A	56.075	0.0844	2.97	2.65	10.01	2.76
8	529	0.07%	19	50	45	30	0.1645	0.0992	0.1013	38301	0.08	0.1973	0.0305	0.988	D	53.328	0.0743	3.29	3.08	9.68	3.19
9	521	0.08%	20.6	50	45	61	0.1674	0.1003	0.2022	80806	0.16	0.3583	0.0489	0.9954	A	59.866	0.0819	3.35	2.80	10.69	2.91
10	544	0.13%	21	50	45	53	0.1784	0.1041	0.1650	69201	0.12	0.2493	0.0445	0.9938	A	58.455	0.0760	3.57	3.05	10.34	3.16
11	526	0.04%	17.8	50	45	30	0.1874	0.1071	0.0889	35100	0.07	0.2440	0.0305	0.9809	D	56.141	0.0710	3.75	3.34	9.52	3.41
12	545	0.13%	21.3	50	45	70	0.2081	0.1136	0.1869	86198	0.13	0.2889	0.0536	0.998	A	59.908	0.0699	4.16	3.47	10.41	3.52
13	541	0.13%	21.9	50	45	70	0.2136	0.1152	0.1821	86613	0.12	0.2918	0.0536	0.9963	A	62.165	0.0708	4.27	3.44	10.43	3.49
14	536	0.10%	20.9	50	45	69	0.2148	0.1155	0.1785	82820	0.12	0.3076	0.0531	0.9958	A	60.067	0.0687	4.3	3.58	10.34	3.60
15	535	0.10%	20.7	50	45	69	0.2237	0.1181	0.1714	80807	0.11	0.2921	0.0531	0.993	D	56.713	0.0642	4.47	3.94	10.17	3.88
16	519	0.08%	20	50	45	31	0.2243	0.1182	0.0768	35562	0.05	0.1770	0.0312	0.9623	D	55.398	0.0630	4.49	4.05	9.22	3.96
17	530	0.07%	19.4	50	45	70	0.2311	0.1201	0.1683	77854	0.11	0.3438	0.0536	0.9935	A	61.068	0.0665	4.62	3.78	10.25	3.76
18	520	0.08%	20.3	50	45	61	0.2479	0.1245	0.1367	67222	0.09	0.2925	0.0489	0.9809	D	59.848	0.0631	4.96	4.14	9.96	4.02
19	559	0.07%	21.7	50	45	21	0.25	0.13	0.05	23843	0.03	0.1588	0.0240	0.9218	D	80.429	0.0785	5.05	3.14	9.23	3.23
20	550	0.07%	20.2	50	45	170	0.2525	0.1257	0.3736	184995	0.24	0.7354	0.0969	0.9953	A	63.865	0.0655	5.05	3.95	11.18	3.89
21	551	0.07%	20.7	50	45	119	0.2531	0.1258	0.2612	131221	0.16	0.5239	0.0764	0.9987	A	59.974	0.0625	5.06	4.22	10.68	4.07
22	552	0.07%	21.2	50	45	80	0.2541	0.1260	0.1749	89276	0.11	0.3731	0.0586	0.9932	A	58.063	0.0610	5.08	4.38	10.18	4.18
23	553	0.07%	21.7	50	45	40	0.2552	0.1263	0.0871	45159	0.05	0.1954	0.0369	0.9053	D	45.056	0.0519	5.1	5.67	9.01	4.91
24	522	0.04%	20.9	50	45	60	0.2593	0.1273	0.1285	65719	0.08	0.3672	0.0484	0.9926	D	58.198	0.0604	5.19	4.46	9.81	4.23

Seq	Ens	Decl	T °C	a (mm)	L (cm)	Q (m³/h)	Prof (m)	Rh (m)	Vel (m/s)	Rey	Froude	Prof Norm (m)	Prof. Crit (m)	Correl	dy/dx	$\Psi \times 10^3$	n Manning	y/a	y/ Ψ	M	U/u _*
25	540	0.13%	21.7	50	45	120	0.2763	0.1313	0.2412	130045	0.15	0.3987	0.0768	0.9977	D	62.9	0.0616	5.53	4.39	10.63	4.19
26	531	0.07%	20.1	50	45	109	0.2806	0.1322	0.2158	112085	0.13	0.4672	0.0720	0.999	A	65.403	0.0628	5.61	4.29	10.55	4.12
27	524	0.04%	17	50	45	89	0.2883	0.1339	0.1715	82760	0.10	0.4969	0.0629	0.9857	A	61.344	0.0594	5.77	4.70	10.18	4.38
28	537	0.10%	21.1	50	45	120	0.2916	0.1346	0.2287	124302	0.13	0.4234	0.0768	0.9947	D	61.688	0.0593	5.83	4.73	10.50	4.39
29	554	0.07%	21.8	50	45	40	0.2965	0.14	0.0749	41864	0.04	0.2243	0.0369	0.9426	D	73.871	0.0664	5.93	4.01	9.52	3.93
30	556	0.07%	22.3	50	45	121	0.2985	0.14	0.23	127936	0.13	0.5014	0.0772	0.9984	A	66.755	0.0617	5.97	4.47	10.59	4.24
31	557	0.07%	22.6	50	45	181	0.2990	0.14	0.34	192780	0.20	0.6817	0.1010	0.9991	A	63.428	0.0596	5.98	4.71	10.97	4.39
32	555	0.07%	22	50	45	84	0.2991	0.14	0.16	87992	0.09	0.3732	0.0606	0.996	D	66.589	0.0616	5.98	4.49	10.19	4.25
33	558	0.07%	23	50	45	20	0.3001	0.14	0.04	21499	0.02	0.1684	0.0233	0.8574	D	106.91	0.0895	6	2.81	9.41	2.92
34	546	0.13%	21.5	50	45	148	0.3058	0.1376	0.2689	151045	0.15	0.4651	0.0883	0.9979	A	66.034	0.0605	6.12	4.63	10.78	4.34
35	547	0.13%	21.8	50	45	164	0.3211	0.1406	0.2838	164260	0.16	0.4905	0.0946	0.9959	A	64.553	0.0583	6.42	4.97	10.79	4.54
36	539	0.13%	21.5	50	45	179	0.3385	0.1438	0.2938	172528	0.16	0.5207	0.1003	0.9997	D	65.537	0.0575	6.77	5.17	10.84	4.64
37	561	0.07%	22.5	50	45	80	0.35	0.14	0.13	78413	0.07	0.3400	0.0586	0.9848	D	66.32	0.0574	6.9	5.20	9.91	4.66
38	560	0.07%	22	50	45	39	0.35	0.15	0.06	37645	0.03	0.2276	0.0363	0.7175	D	88.547	0.0695	6.92	3.91	9.53	3.85
39	562	0.07%	23.5	50	45	175	0.35	0.15	0.28	175283	0.15	0.6462	0.0988	0.997	A	67.762	0.0579	6.97	5.14	10.82	4.63
40	525	0.04%	17.4	50	45	119	0.3549	0.1467	0.1863	99570	0.10	0.6274	0.0764	0.9931	A	70.458	0.0589	7.1	5.04	10.40	4.57
41	538	0.10%	21.3	50	45	179	0.3567	0.1470	0.2788	166425	0.15	0.5678	0.1003	0.9963	A	67.03	0.0569	7.13	5.32	10.80	4.73
42	532	0.07%	20.4	50	45	149	0.3570	0.1470	0.2318	135039	0.12	0.5474	0.0887	0.9964	D	64.708	0.0558	7.14	5.52	10.55	4.83
43	523	0.04%	21.4	50	45	89	0.3726	0.1496	0.1327	80860	0.07	0.4684	0.0629	0.9485	D	65.634	0.0552	7.45	5.68	9.93	4.91
44	548	0.08%	22.1	50	45	157	0.3911	0.1525	0.2230	141246	0.11	0.5814	0.0919	0.9969	D	72.24	0.0572	7.82	5.41	10.61	4.78
45	564	0.07%	24.1	50	45	40	0.40	0.15	0.06	37295	0.03	0.2549	0.0369	0.5762	D	117.65	0.0788	8.08	3.43	9.78	3.49
46	563	0.07%	23.8	50	45	80	0.40	0.15	0.11	73971	0.06	0.3367	0.0586	0.9541	D	72.664	0.0567	8.08	5.56	9.81	4.85
47	549	0.08%	22.4	50	45	168	0.4124	0.1556	0.2263	147513	0.11	0.6165	0.0961	0.9951	D	75.343	0.0574	8.25	5.47	10.66	4.81

O controle da qualidade dos resultados foi efetuado a partir do coeficiente de correlação de Pearson, já definido anteriormente, calculado para cada ensaio realizado.

Vários fatores podem influir na qualidade do resultado, com origens tanto na montagem experimental como erros acidentais. Entre os primeiros destacam-se as ondulações transversais e cruzadas na superfície livre, ocasionadas pelo efeito de parede e a oscilação de massa de grande período ocasionada pela reflexão das ondas ao longo do canal. Em ambos os casos, são induzidos erros na medição de nível d'água, que se refletem no ajuste do modelo aos dados. Os erros acidentais mais freqüentes concentraram-se na leitura equivocada das pontas limnimétricas.

Em termos estatísticos, 81% dos ensaios apresentaram correlação superior a 0,95 sendo que 56% dos apresentam correlação superior a 0,99, conforme indica o histograma de freqüência dos valores de correlação obtidos nos ensaios.

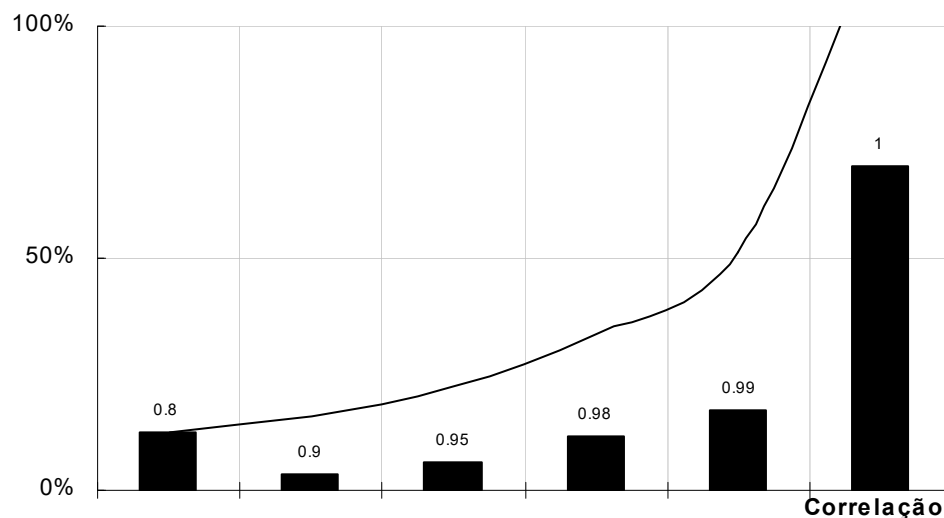


Fig. 4-7: Histograma de freqüência dos valores de correlação obtidos nos ensaios

As figuras a seguir apresentam os resultados das tensões tangenciais resultantes para cada configuração ensaiada, comparadas com os dados de BRIGHETTI *at alli.* (2001), constantes do APÊNDICE B.

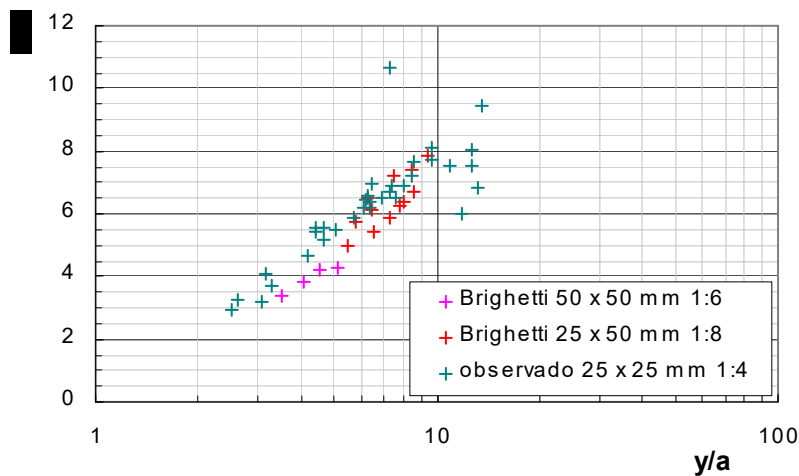


Fig. 4-8: Ensaios com elementos de 25 x 25 mm $E/a=4$ $t/a=1$

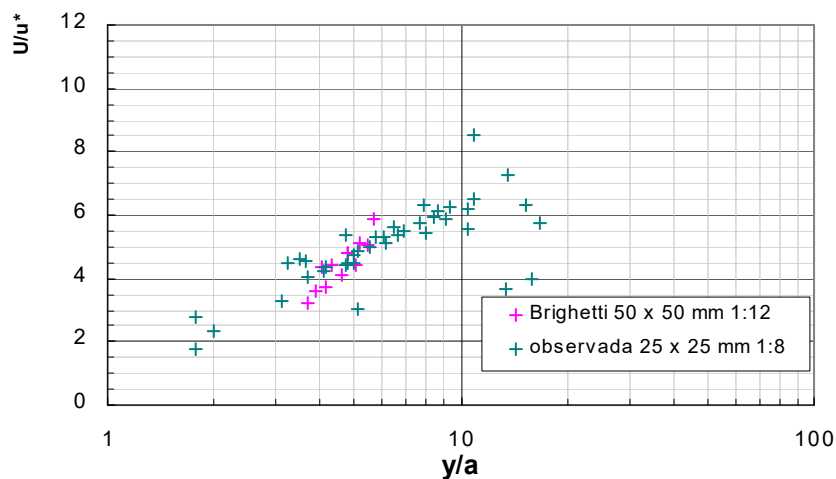


Fig. 4-9: Ensaios com elementos de 25 x 25 mm $E/a=8$ $t/a=1$

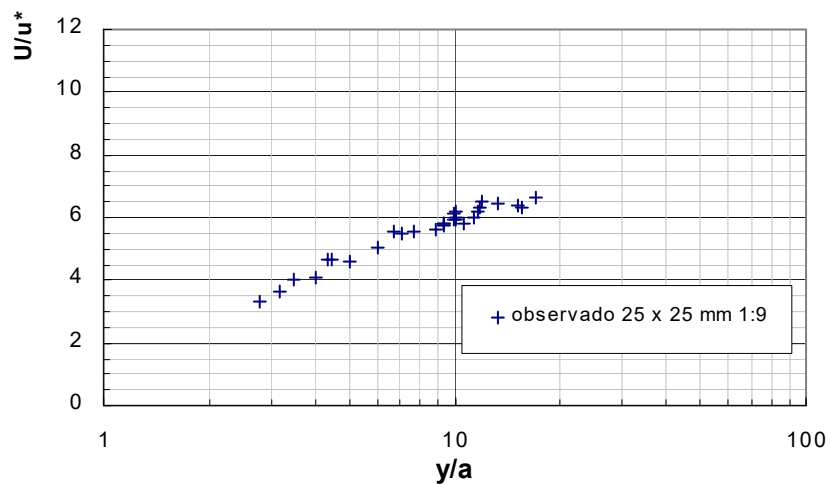


Fig. 4-10: Ensaios com elementos de 25 x 25 mm $E/a=9$ $t/a=1$

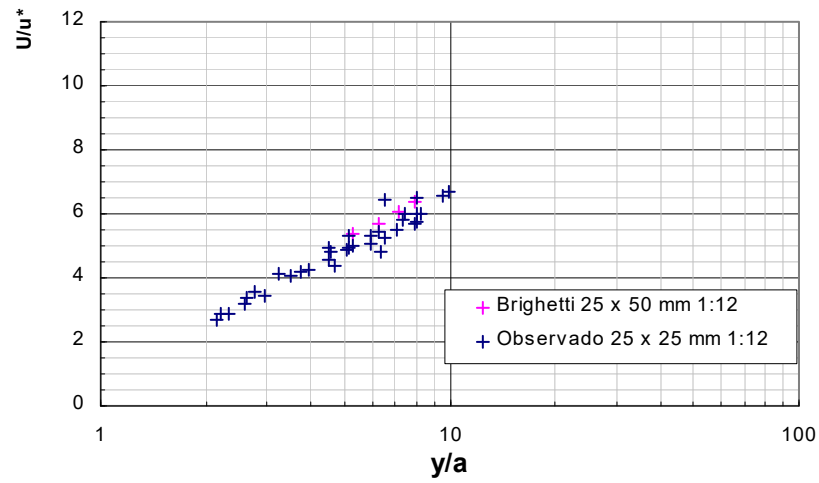


Fig. 4-11: Ensaios com elementos de 25 x 25 mm $E/a=12$ $t/a=1$

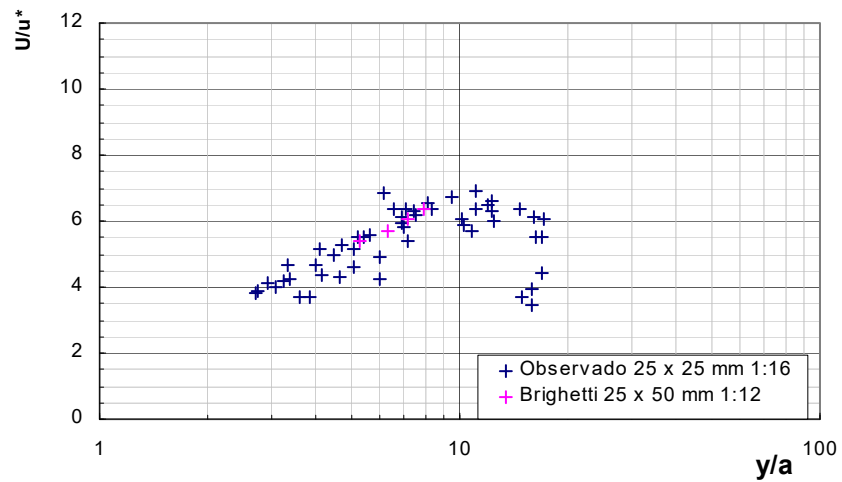


Fig. 4-12: Ensaios com elementos de 25 x 25 mm $E/a=16$ $t/a=1$

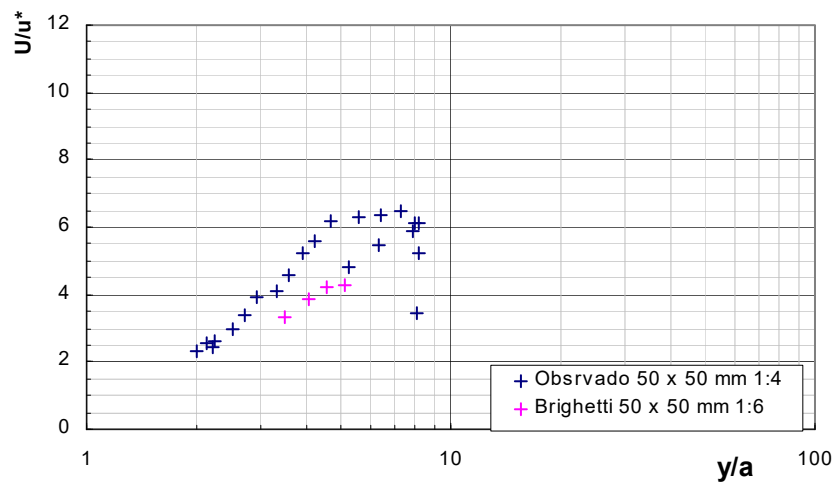


Fig. 4-13: Ensaios com elementos de 50 x 50 mm $E/a=4$ $t/a=1$

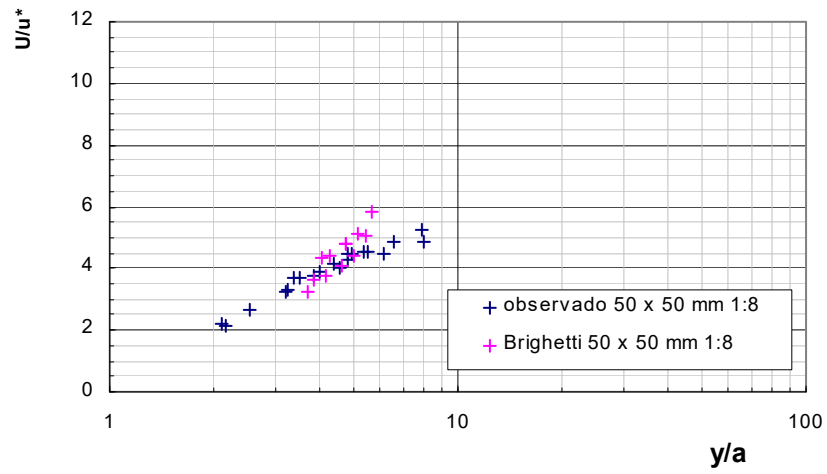


Fig. 4-14: Ensaios com elementos de 50 x 50 mm $E/a=8$ $t/a=1$

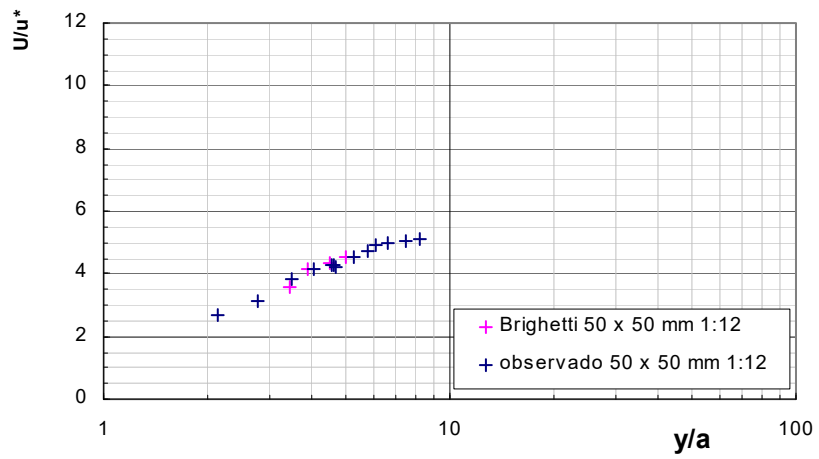


Fig. 4-15: Ensaios com elementos de 50 x 50 mm $E/a=12$ $t/a=1$

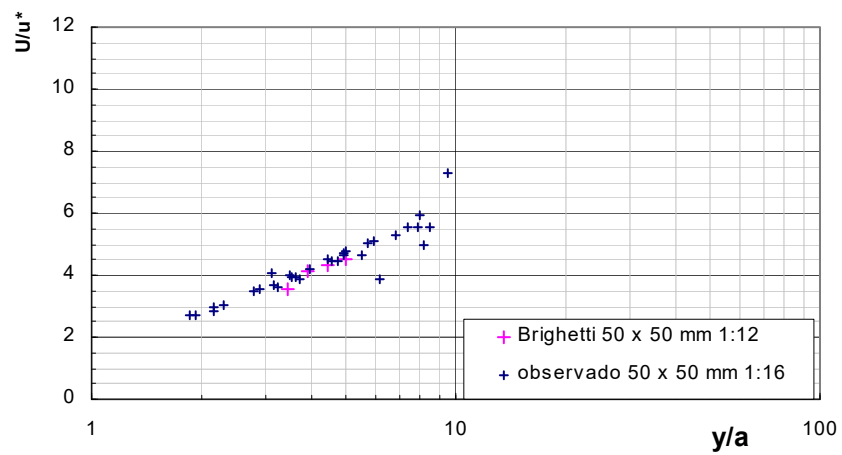


Fig. 4-16: Ensaios com elementos de 50 x 50 mm $E/a=16$ $t/a=1$

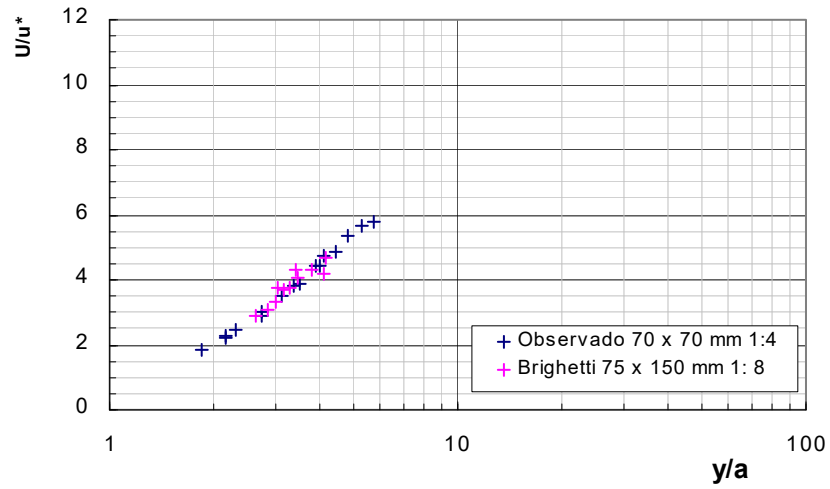


Fig. 4-17: Ensaios com elementos de 70 x 70 mm $E/a=4$ $t/a=1$

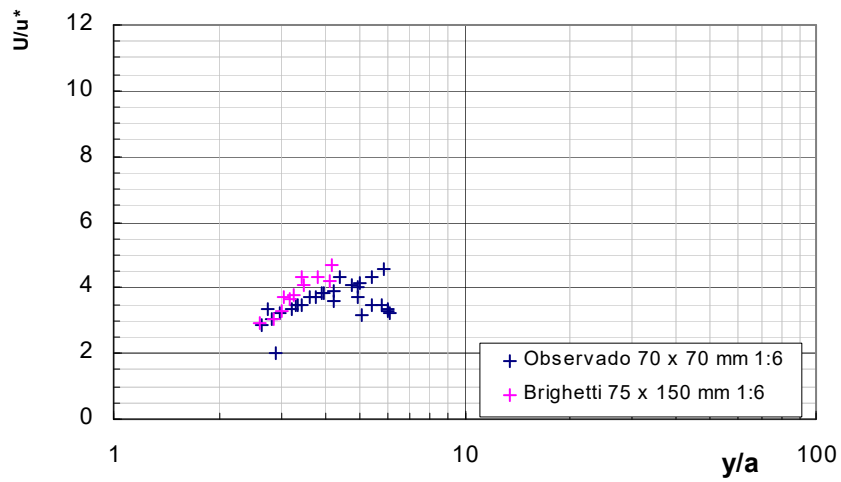


Fig. 4-18: Ensaios com elementos de 70 x 70 mm $E/a=6$ $t/a=1$

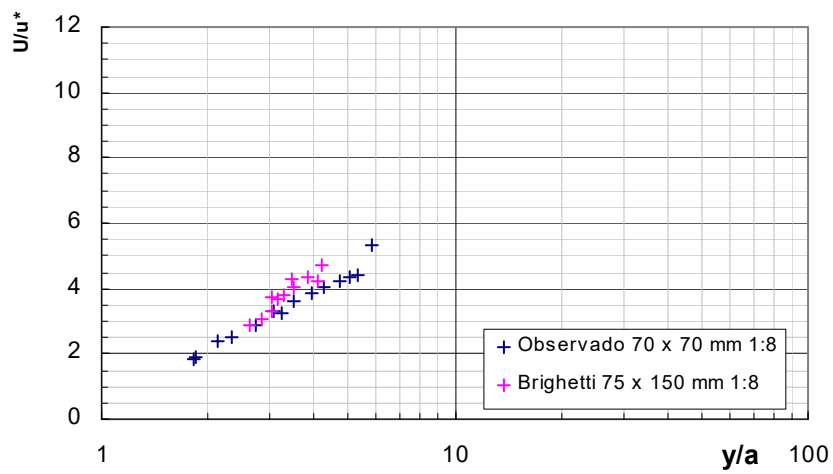


Fig. 4-19: Ensaios com elementos de 70 x 70 mm $E/a=8$ $t/a=1$

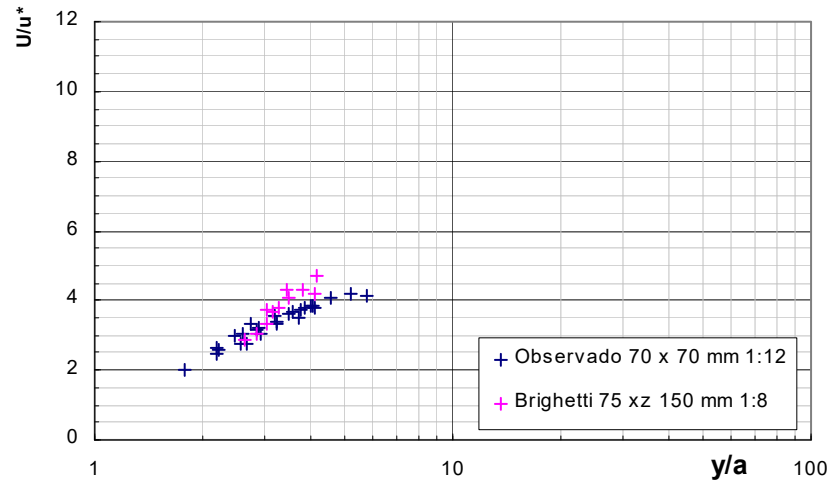


Fig. 4-20: Ensaios com elementos de 70 x 70 mm $E/a=12$ $t/a=1$

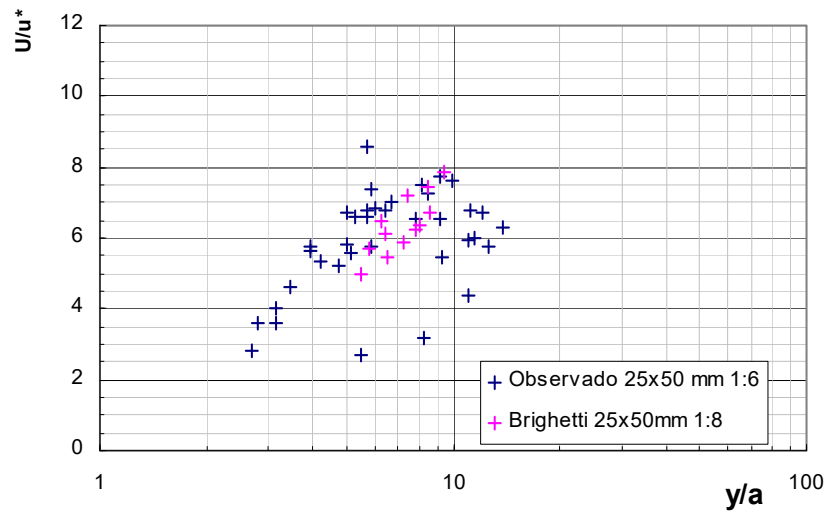


Fig. 4-21: Ensaios com elementos de 25 x 50 mm $E/a=6$ $t/a=2$

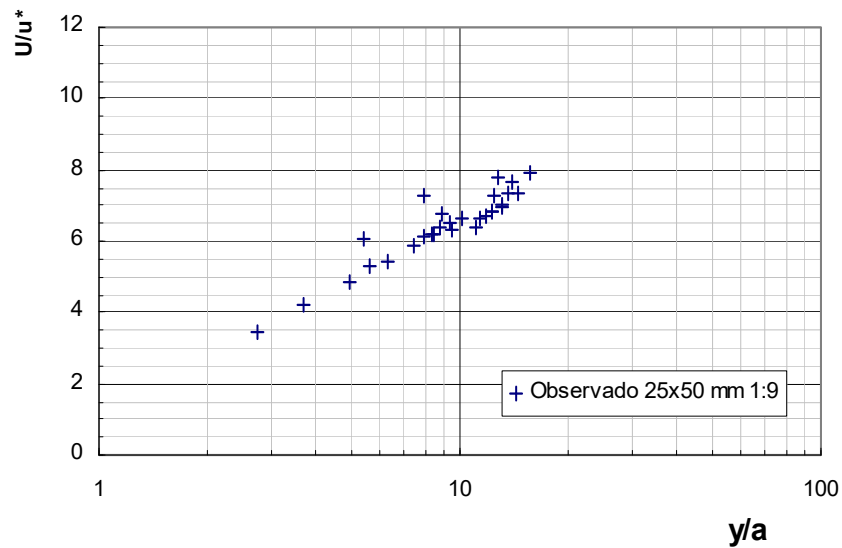


Fig. 4-22: Ensaios com elementos de 25 x 50 mm $E/a=9$ $t/a=2$

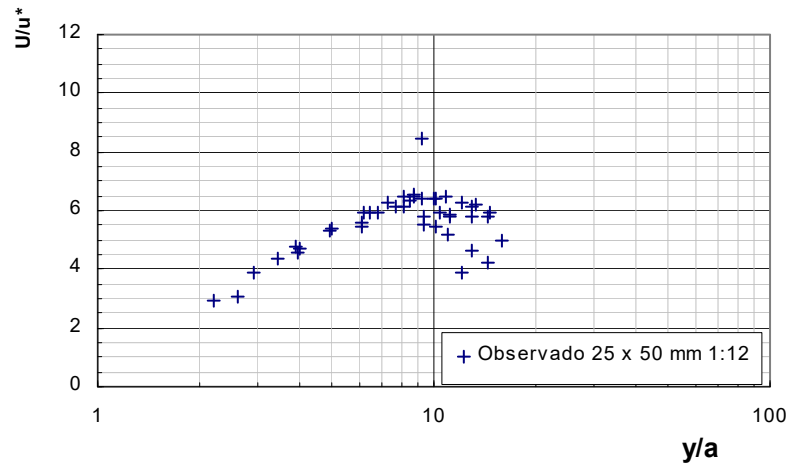


Fig. 4-23: Ensaios com elementos de 25 x 50 mm $E/a=12$ $t/a=2$

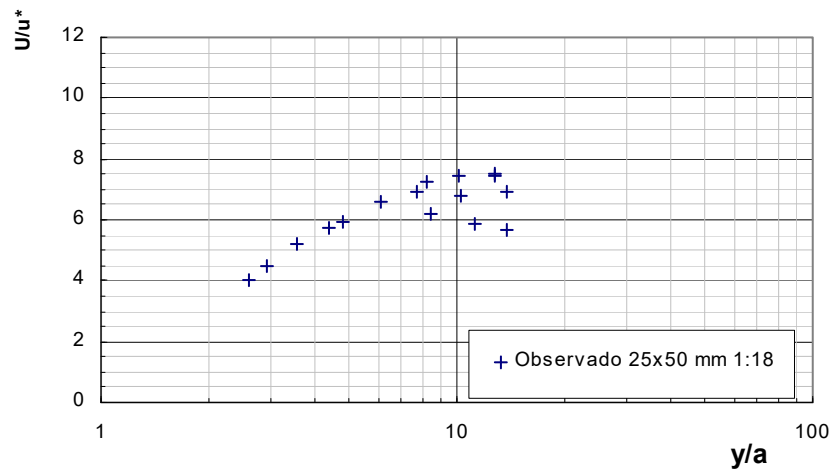


Fig. 4-24: Ensaios com elementos de 25 x 50 mm $E/a=18$ $t/a=2$

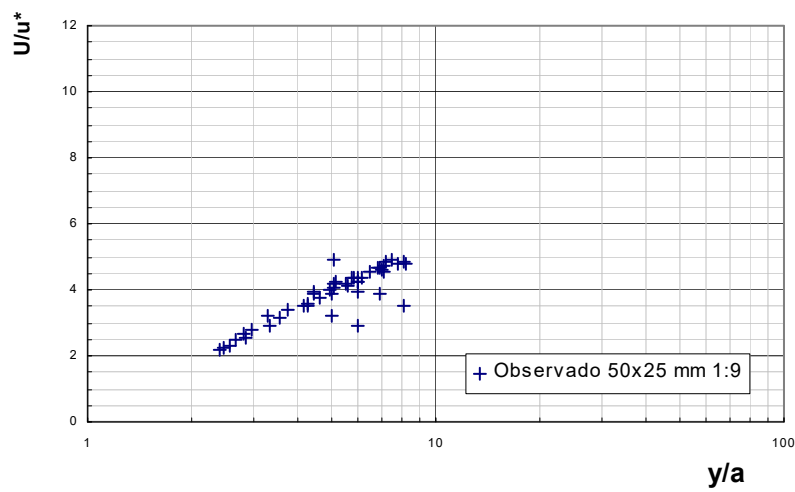


Fig. 4-25: Ensaios com elementos de 50 x 50 mm $E/a=9$ $t/a=0,5$

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

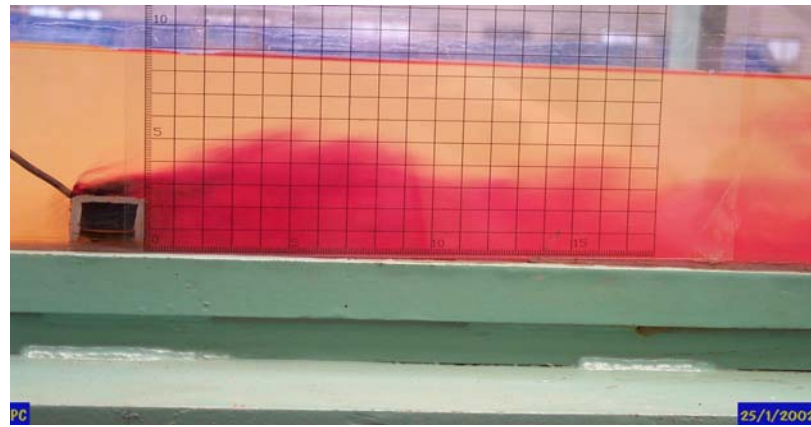
5.1 Comportamento do Escoamento

O escoamento sobre os travessões apresenta comportamento nitidamente relacionado com o espaçamento longitudinal entre os elementos, conforme já haviam apontado MORRIS e WIGGERT (1972) e KNIGHT & MACDONALD (1978), com referência à camada de interferência gerada pelos macro-vórtices de eixo horizontal criados pelos obstáculos. Aqueles autores denominaram esta camada como zona hiper-turbulenta.

A espessura de desenvolvimento desta zona de interferência é influenciada tanto pelo espaçamento longitudinal dos elementos (Foto 12) como pela profundidade e velocidade (Foto 13), podendo atingir a superfície em função da combinação destes parâmetros.

A camada hiper-turbulenta inicia-se junto ao bordo de ataque do obstáculo e se desenvolve no sentido do escoamento, podendo atingir ou não a superfície livre. Quando os obstáculos estão suficientemente distantes, a espessura da camada de interferência diminui progressivamente para jusante. O núcleo de separação, onde as velocidades são muito baixas ou próximas de zero, eleva-se em relação ao fundo do canal antes de atingir o próximo obstáculo, existindo espaço para a formação de um novo macro-vórtice. Esta situação se apresenta quando a relação entre o espaçamento longitudinal e a altura do obstáculo é superior a 8.

Por outro lado, quando esta relação é inferior a 8, ou seja, quando os obstáculos estão mais próximos, a altura da camada de interferência não se reduz antes do próximo obstáculo e o núcleo de velocidades baixas preenche todo o espaço disponível.



$$y/a = 3,8 - E/a = 16 - t/a = 1$$



$$y/a = 3,8 - E/a = 8 - t/a = 1$$



$$y/a = 3,8 - E/a = 4 - t/a = 1$$

Foto 12: Comportamento da camada de interferência hiper-turbulenta em função do espaçamento longitudinal dos obstáculos

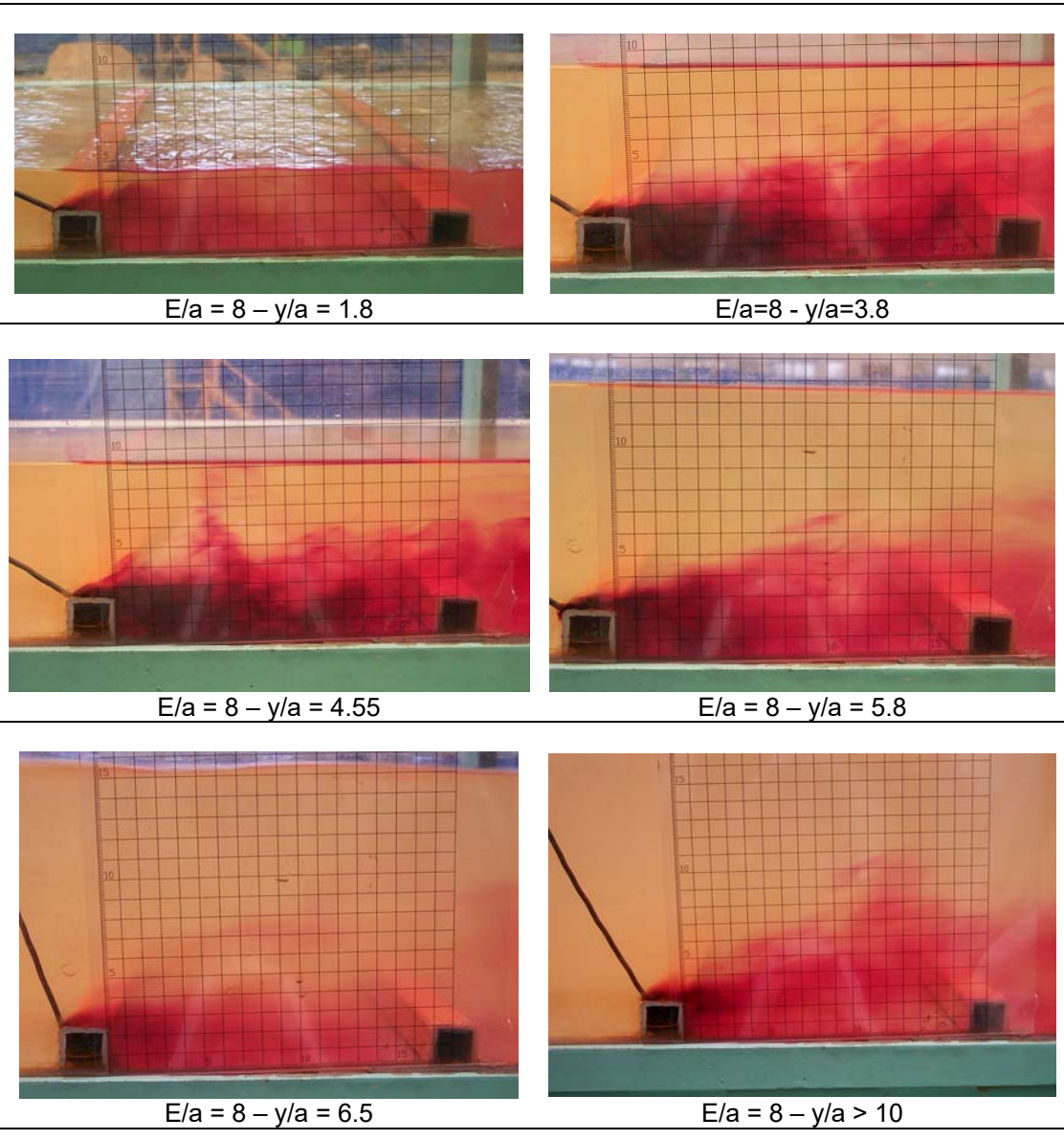


Foto 13 : Comportamento do escoamento para diferentes profundidades

Este comportamento pode ser melhor compreendido através do emprego de um modelo matemático de simulação do campo bidimensional vertical de velocidades que permita visualizar o efeito dos obstáculos de fundo sobre o fluxo.

Para tanto adaptou-se a técnica de modelação matemática das equações de Navier-Stokes (Eq. 5-1) para determinação do campo de velocidades ao redor dos obstáculos de fundo como aqueles estudados em modelo físico.

Esta técnica consiste na resolução das equações de quantidade de movimento e conservação de massa através de discretização por intermédio de uma malha escalonada (MARTINS, 1989) e solução pelo método de diferenças finitas explícito denominado SOLA, conforme detalhadamente descrito em FORTUNA(2000).

$$\text{Eq. 5-1} \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial^2 y} \right) = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial^2 y} \right) = 0$$

A solução das equações é obtida considerando velocidades uniformes na fronteira de entrada e extrapolação de primeira ordem do gradiente de velocidades junto às fronteiras fixas onde u e v são nulos. A solução do termo de *Poisson* presente nas duas equações é obtida por iterações sucessivas.

Para visualização dos resultados foi desenvolvido um aplicativo computacional destinado a simulação de diferentes combinações entre o arranjo geométrico dos obstáculos, a relação y/a e a velocidade permanente e uniforme admitida na região a montante da interferência dos obstáculos.

A Fig. 5-1 apresenta o esquema dos perfis de velocidade calculados para diferentes combinações simulando obstáculos de 50 x 50 mm de seção transversal e diferentes relações de espaçamento E/a. O modelo foi aplicado para malha de x : y igual a 0,01

x 0,005 m representando um trecho de 4 m de comprimento por 0,30 m de altura, por limitações computacionais, sendo o comprimento útil de análise de 3 m. A visualização do efeito dos obstáculos no escoamento é apresentada na Fig. 5-2, com a técnica de contraste de cores, para identificar as regiões onde a velocidade é afetada pelo efeito da geometria do contorno. A cor mais escura indica pontos de velocidade nula enquanto o branco representa a velocidade máxima registrada em todo o campo calculado. Desta forma, a comparação de dois perfis permite inferir a região do escoamento que apresenta desvios em relação à velocidade máxima.

Pode-se constatar a nítida mudança de comportamento dos vetores velocidade delimitada pela relação $y/a=8$. Enquanto para esta relação e superiores observa-se a existência de dois vórtices bem estabelecidos na região entre os obstáculos, as relações $E/a=6$ e $E/a=4$ apresentam um único.

A Fig. 5-3 permite comparar a região afetada pela presença dos obstáculos para diferentes velocidades e profundidades relativas. Verifica-se que a velocidade do escoamento tem pouca influência na extensão da zona de interferência porém o mesmo não ocorre com a relação y/a podendo-se concluir que a altura da zona de interferência dependerá diretamente deste parâmetro porém não o número de Reynolds.

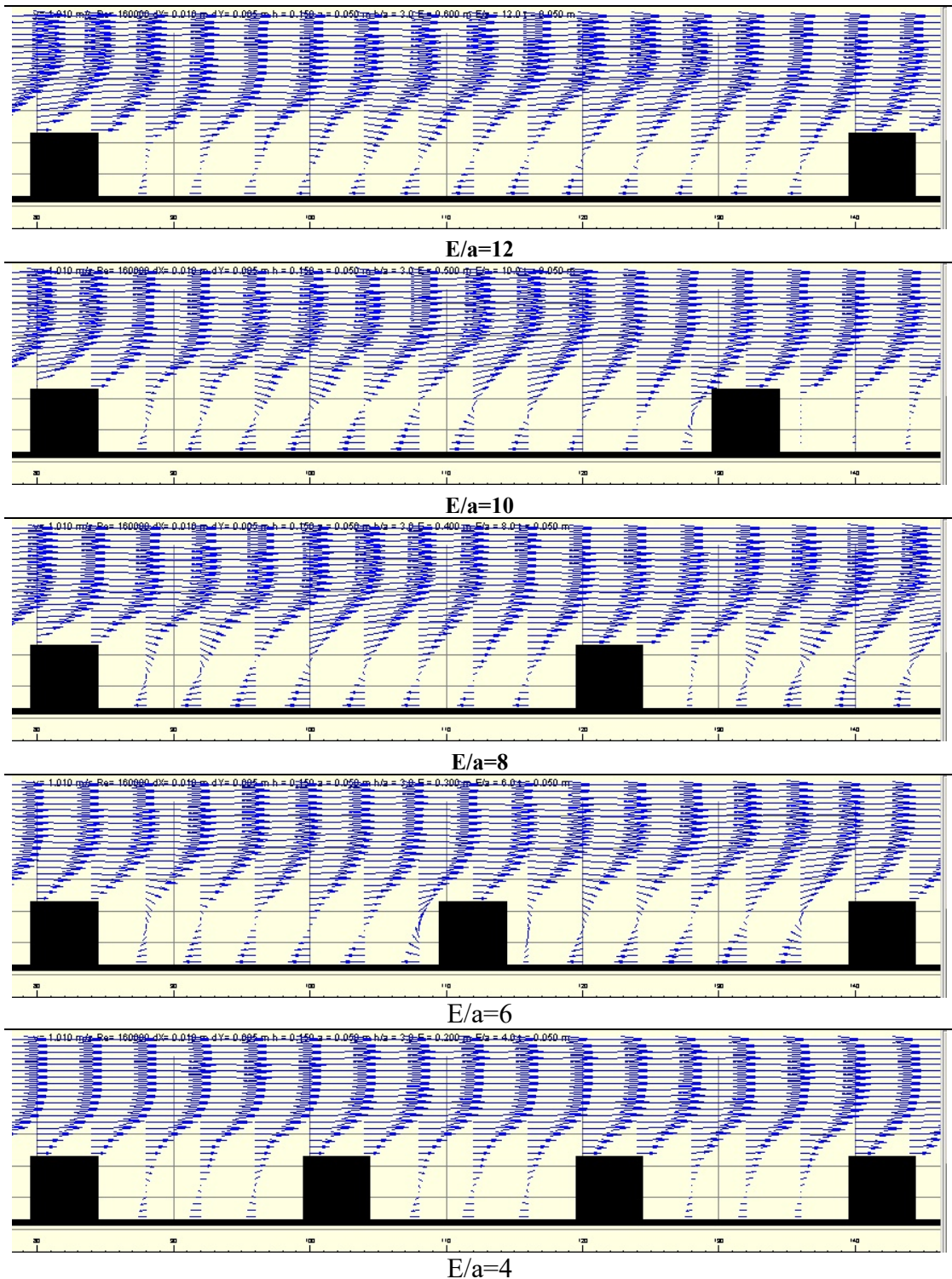


Fig. 5-1: Perfis de velocidade calculados através do modelo matemático com relações de espaçamento $4 \leq E/a \leq 12$, $y/a=3$, $t/a=1$ e $Re=160.000$

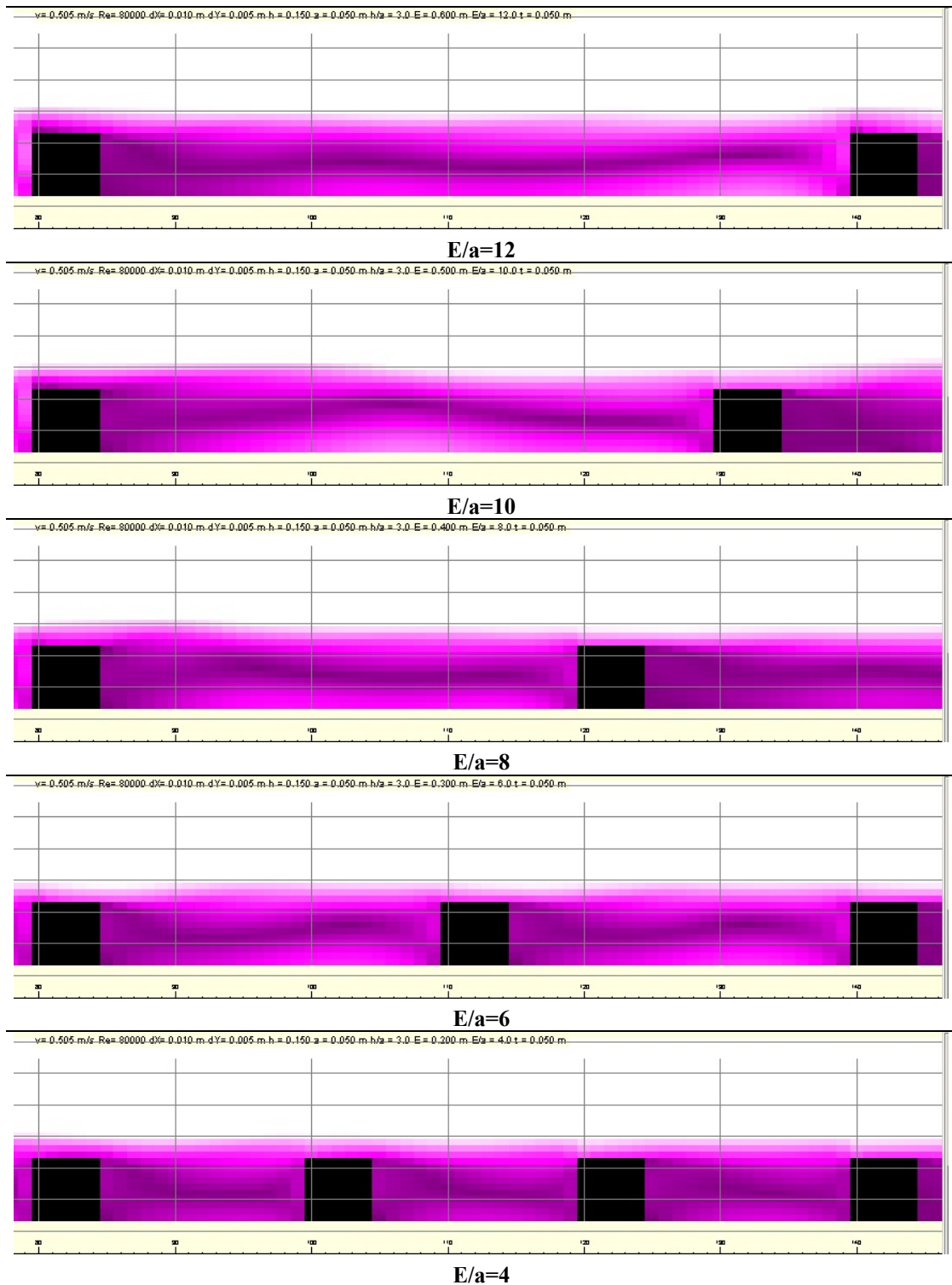


Fig. 5-2: Visualização da variação das velocidades ao redor dos obstáculos de fundo com a técnica de contraste de cores, para diferentes condições de espaçamento com $y/a=3$, $t/a=1$ e $Re=80.000$

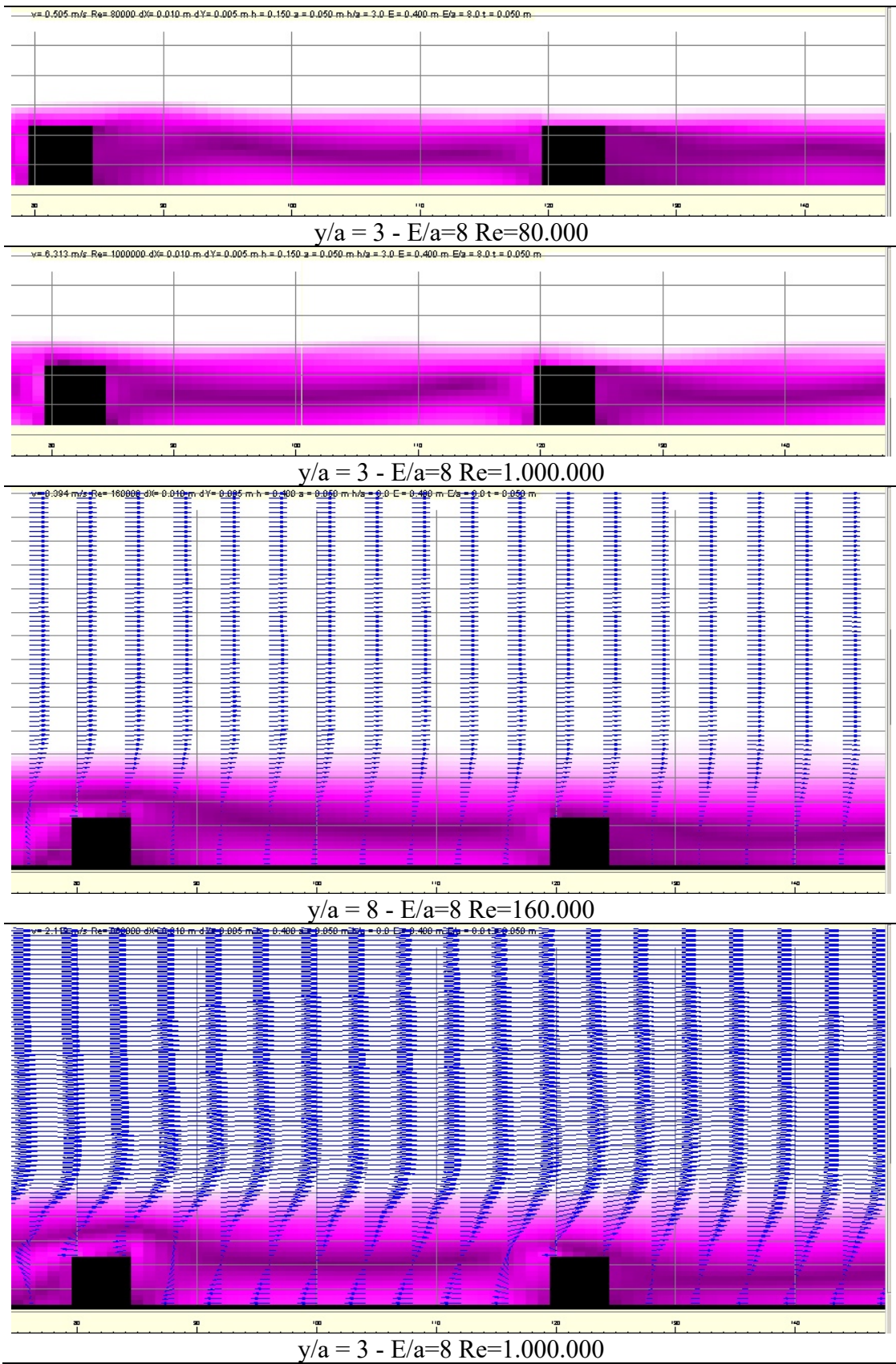


Fig. 5-3: Efeito da velocidade do escoamento e da relação e/a na zona afetada pelo efeito da macro-turbulência

5.2 Análise pelo Modelo Tipo Manning

A análise do efeito da macro rugosidade de fundo representada pelos travessões de seção retangular pode ser efetuada através do emprego de um coeficiente semelhante ao de Manning, que atende à relação indicada na Eq. 5-2. O emprego de um coeficiente semelhante ao de Manning é útil dada à tradição e o costume do emprego desta formulação, principalmente nos programas de cálculo antigos.

Eq. 5-2:
$$\frac{U}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{y^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{g \cdot n}}$$

O comportamento do coeficiente de Manning permite verificar a redução da influência dos travessões à medida que a profundidade do escoamento aumenta, ou seja, verifica-se uma perda de efeito sobre a resistência ao escoamento para altos valores de y/a . Nestas situações o número de Manning correspondente tende a refletir apenas um efeito de fundo constante. Esta tendência fica evidenciada na Fig. 5-4.

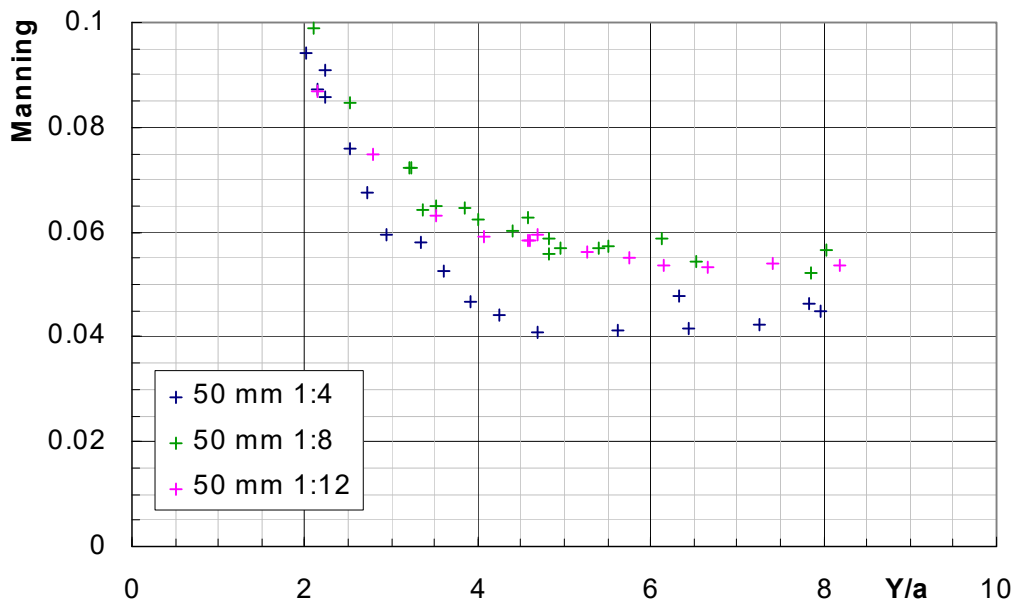


Fig. 5-4: Comportamento do Número de Manning nos ensaios realizados

O valor de número de Manning varia com o espaçamento longitudinal e a profundidade y/E , e também com a relação entre o espaçamento e a altura dos elementos E/a , conforme pode ser observado nas figuras seguintes. Os dados coletados permitem o agrupamento dos pontos em torno de curvas características definidas pela relação E/a . Verifica-se que a dispersão maior se dá para os pontos correspondentes aos ensaios com os blocos de 25 x 25 mm e 25x50 mm, que como já discutido capítulo anterior, apresentam a maior incerteza na medição devido aos baixos valores da perda de carga.

Os pontos agrupados nas curvas da Fig. 5-6 podem ser equacionados visando uma utilização prática através de uma expressão do tipo potencial, onde os parâmetros α , β e γ dependem da relação E/a e t/a , conforme indicado na Tab. 5-1. Já as curvas da Fig. 5-7, referentes a relação $t/a=2$ são pouco representativas uma vez que foram realizados testes apenas para uma altura de obstáculo. Na Fig. 5-5 observa-se a correlação entre os valores de n obtidos diretamente dos ensaios em modelo físico e aquelas calculados pela correlação da Eq. 5-3.

$$\text{Eq. 5-3} \quad n = \alpha + \beta \left(\frac{y}{E} \right)^\gamma$$

Tab. 5-1: Coeficientes experimentais da relação n x (y/E)

E/a	α	β	γ	Correlação R^2
4	0.013662	2.32553	0.037815	0.914
8	0.008066	1.423331	0.038789	0.813
12	0.006714	1.196404	0.040366	0.885
16	0.004876	1.001527	0.038778	0.994

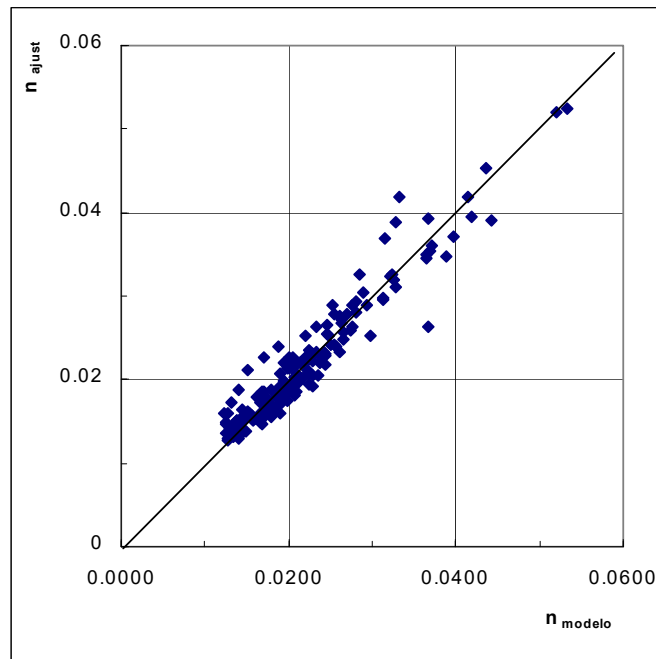


Fig. 5-5: Correlação dos valores de n obtida com a Eq. 5-3

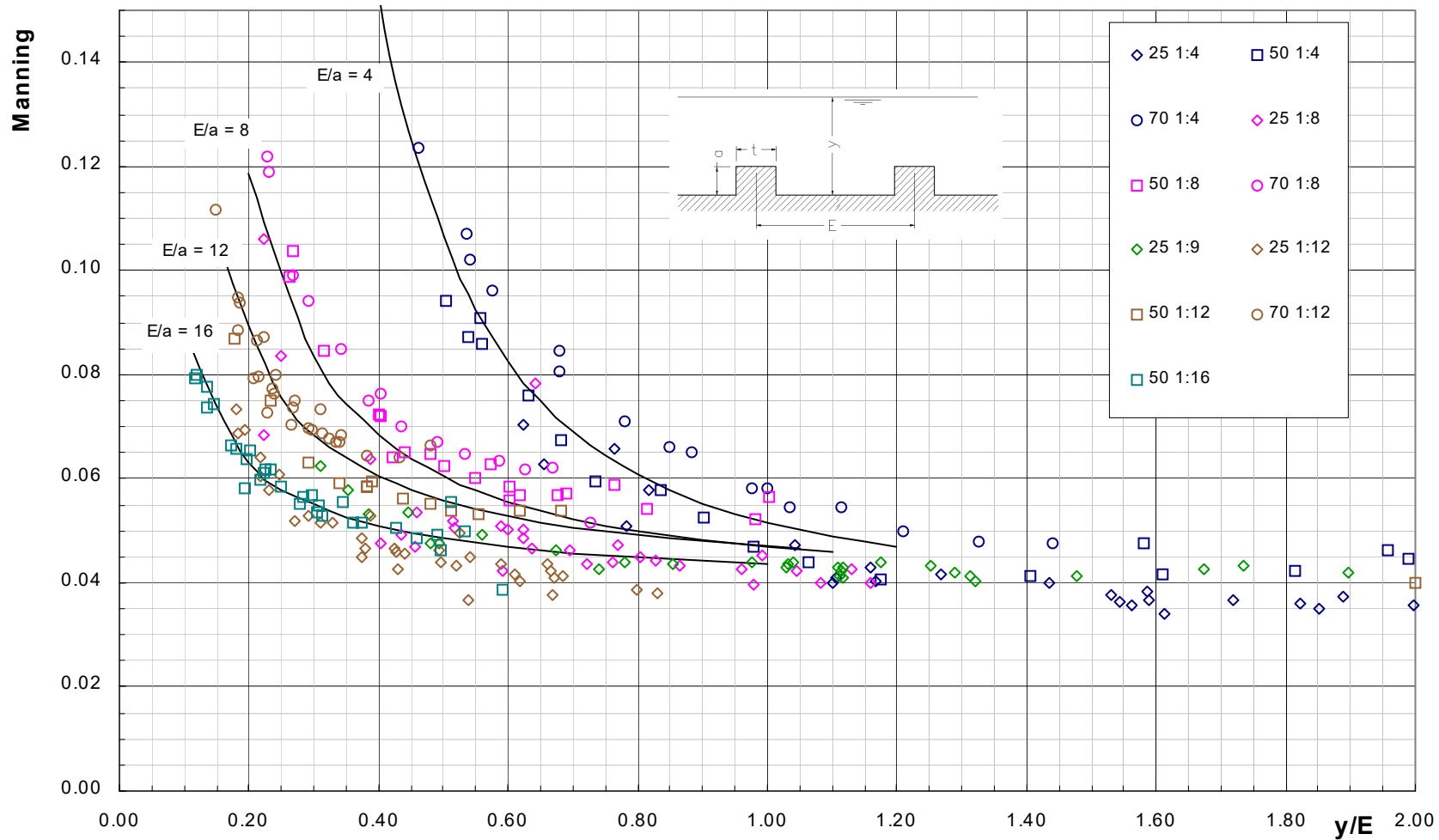


Fig. 5-6: Relação n x (y/E) para diferentes relações E/a ensaiadas e $t/a = 1$

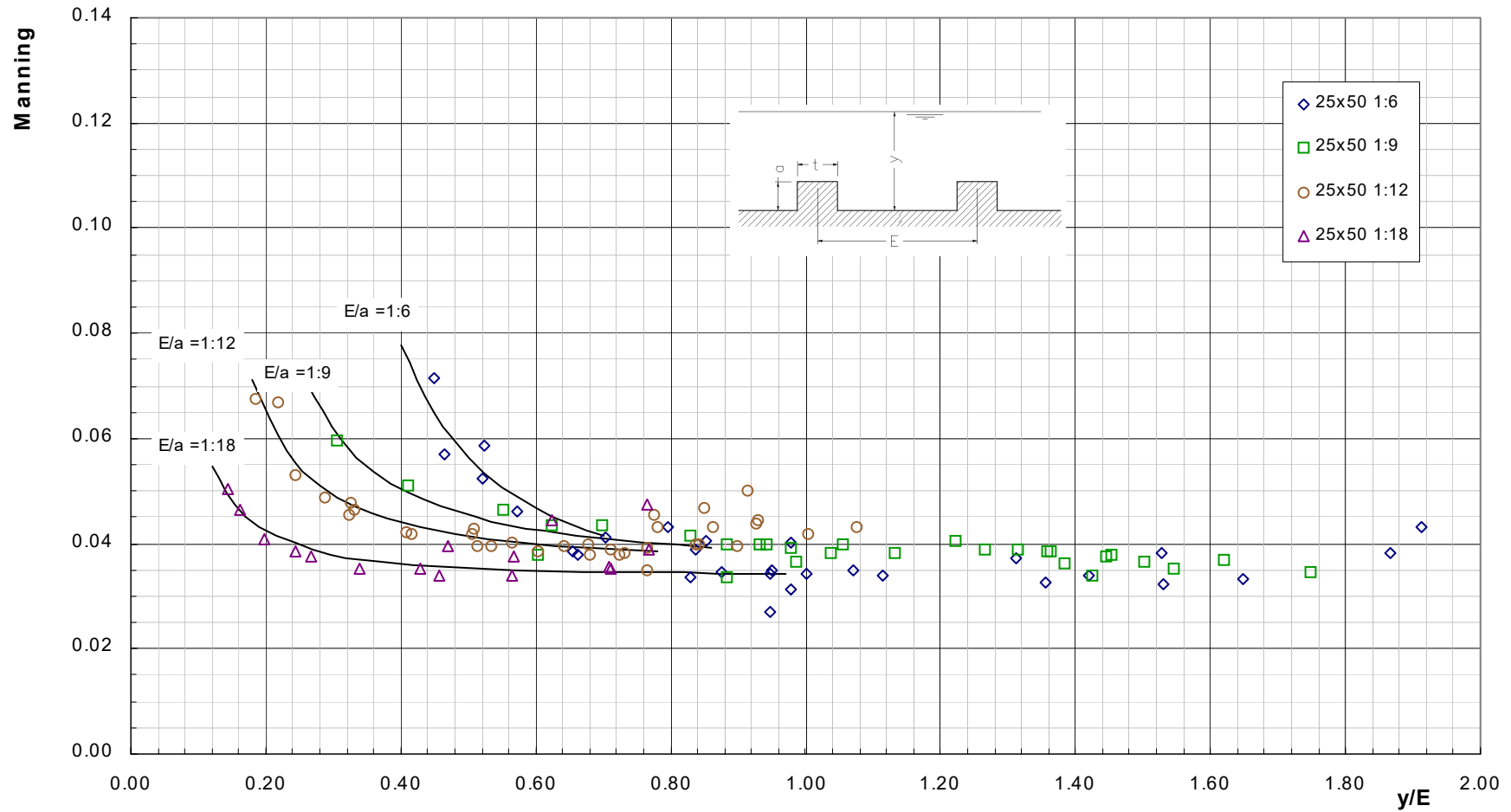


Fig. 5-7: Relação n x (y/E) para diferentes relações E/a ensaiadas e $t/a = 2$

5.3 Análise pelo Modelo Logarítmico

A lei logarítmica do tipo $U/u_* = C_1 \cdot \log(y/a) + C_2$ apresenta razoáveis resultados quando aplicada ao problema da macro-rugosidade, como ficou demonstrado nos trabalhos de diversos pesquisadores. Aplicada ao problema dos travessões, apresenta uma vantagem sobre o modelo *Manning*, que é a obtenção de leis totalmente adimensionais.

A constante C_1 é função do coeficiente de *von Karman*, que pode variar ao redor de 0,4, tendo sido sugerido por DAVIDIAN & COLOSEUS (1958) e SAYRE & ALBERTSON (1961) o valor de 0,38, o que resulta para C_1 o valor 6,06.

A constante C_2 depende da geometria (a e E) dos travessões de fundo e pode ser determinada a partir dos dados experimentais, ajustando-se a cada série ensaiada a lei logarítmica básica. O valor da constante C_2 é obtido numericamente para a condição $y/a = 1$ e engloba as características geométricas da macro-rugosidade, guardando uma relação com o espaçamento longitudinal e a altura do obstáculo.

A constante C_2 pode ser convertida num parâmetro único função $\psi = \chi/a$ de acordo com a Eq. 5-4. Este parâmetro guarda relação com as características geométricas do travessão, conforme mostra a Fig. 5-8, e é similar ao adotado por outros pesquisadores para correlação entre dados de diferentes origens e configurações. Os valores resultantes para os parâmetros C_2 e ψ estão indicados na Tab. 5-2.

$$\text{Eq. 5-4} \quad \frac{U}{u_*} = C_1 \cdot \log\left(\frac{y}{a}\right) + C_2 = C_1 \cdot \log\left(\frac{y}{\chi}\right) + C_1 \cdot \log\left(\frac{\chi}{a}\right)$$

$$\psi = f(\%E)$$

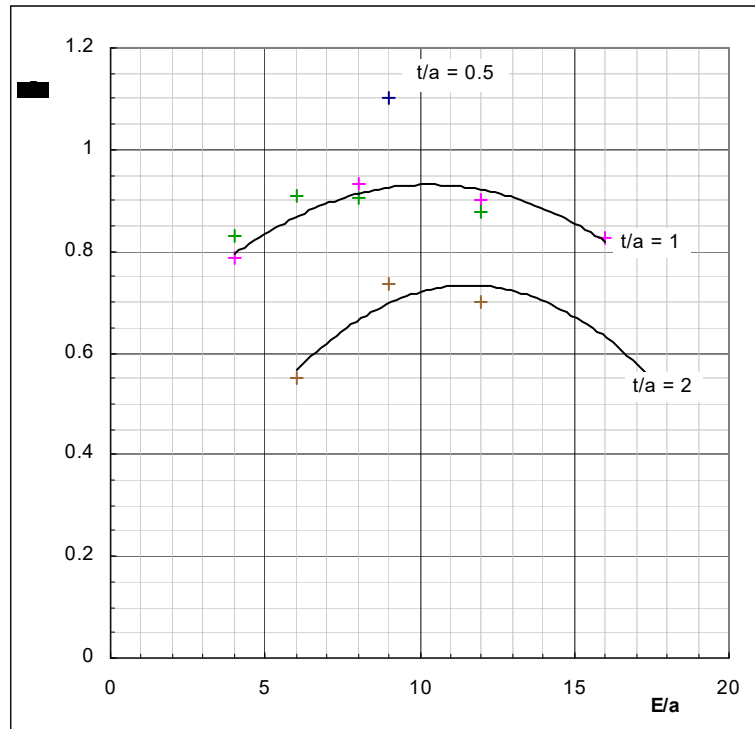


Fig. 5-8: Relação da constante C_2 com o espaçamento longitudinal

Tab. 5-2: Valores do Coeficiente C_2 da lei Logarítmica $U/u_* = 6.06 \log(y/a) + C_2$

a (mm)	e (mm)	E (cm)	E/a	t/a	C_2	X	$\psi = X/a$
25	25	100	4	1	1.1939	0.016	0.6353
25	25	200	8	1	0.5206	0.021	0.8205
25	25	225	9	1	0.5065	0.021	0.8249
25	25	300	12	1	0.6656	0.019	0.7765
25	25	400	16	1	1.0183	0.017	0.6792
50	50	200	4	1	0.6273	0.039	0.7879
50	50	400	8	1	0.1845	0.047	0.9323
50	50	600	12	1	0.2738	0.045	0.9012
50	50	800	16	1	0.5035	0.041	0.8259
70	70	280	4	1	0.4952	0.058	0.8285
70	70	420	6	1	0.2515	0.064	0.9089
70	70	560	8	1	0.2653	0.063	0.9041
70	70	840	12	1	0.3431	0.061	0.8778
25	50	150	6	2	1.5680	0.014	0.5511
25	50	225	9	2	0.8050	0.018	0.7365
25	50	300	12	2	0.9304	0.018	0.7022
25	50	450	18	2	1.7159	0.013	0.5210
50	25	450	9	0.5	-0.2555	0.055	1.1019

Definindo-se desta forma, os dados podem ser comparados em relação à lei padrão de inclinação igual à 6.06 de SAYRE e ALBERTSON(1961), conforme mostra a Fig. 5-9.

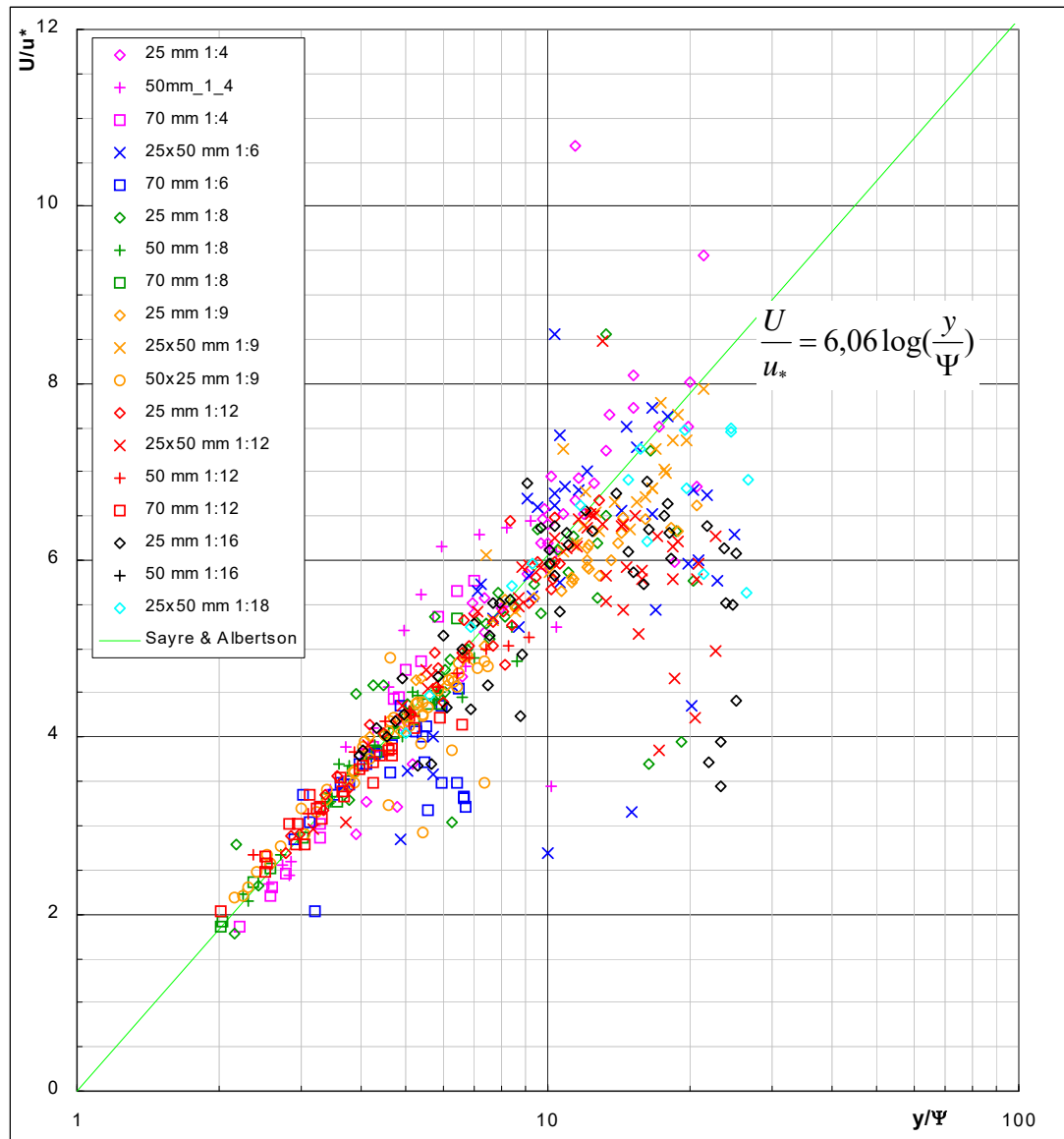


Fig. 5-9: Dados Experimentais comparados com a lei logarítmica

A resposta apresentada pelo modelo logarítmico tem comportamento similar ao obtido por outros pesquisadores. A existência de grande dispersão nos pontos experimentais torna pouco segura a extrapolação do resultado para relações y/Ψ superiores a 10.

Para valores de y/a inferiores a 3 e superiores a 8 algumas discrepâncias sistemáticas puderam ser observadas entre os resultados experimentais e a lei representada pela reta de coeficiente angular igual a 6,06, como ilustram as figuras a seguir.

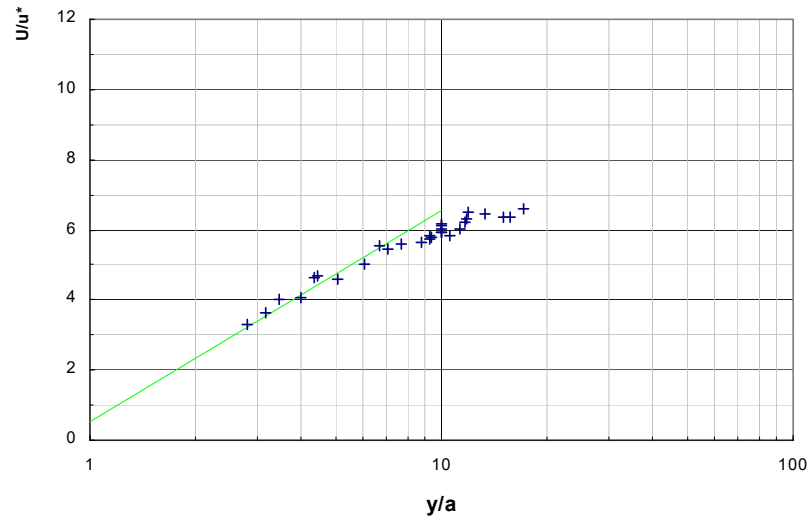


Fig. 5-10: Pontos Experimentais e Modelo Logarítmico - Obstáculos 25 x 25 mm $E/a = 9$

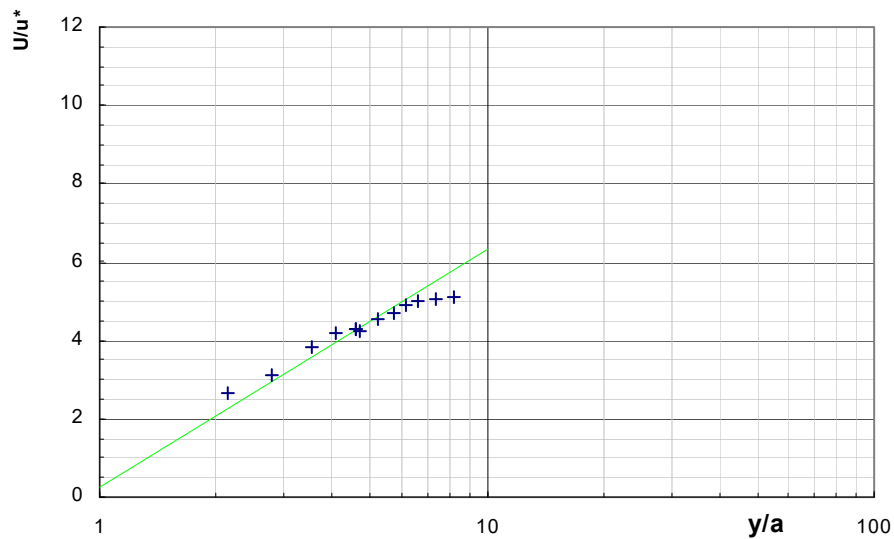


Fig. 5-11: Pontos Experimentais e Modelo Logarítmico - Obstáculos 50 x 50 mm $E/a = 12$

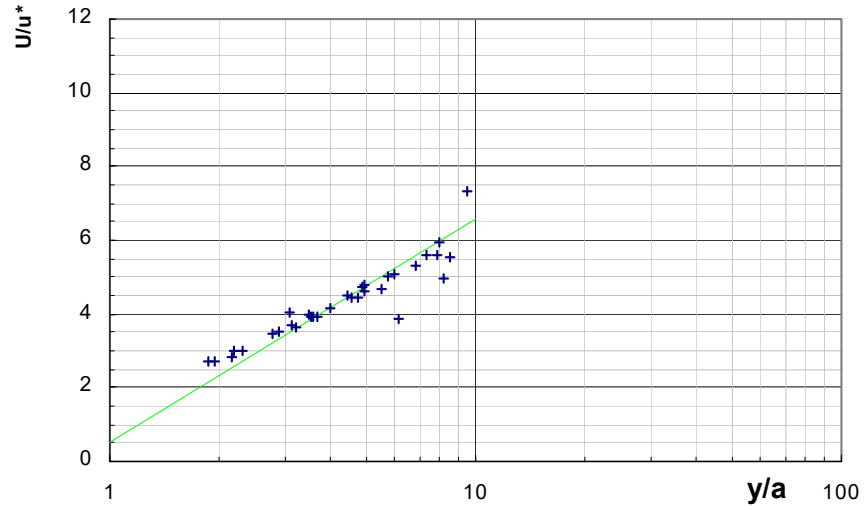


Fig. 5-12: Pontos Experimentais e Modelo Logarítmico - Obstáculos 50 x 50 mm E/a =16

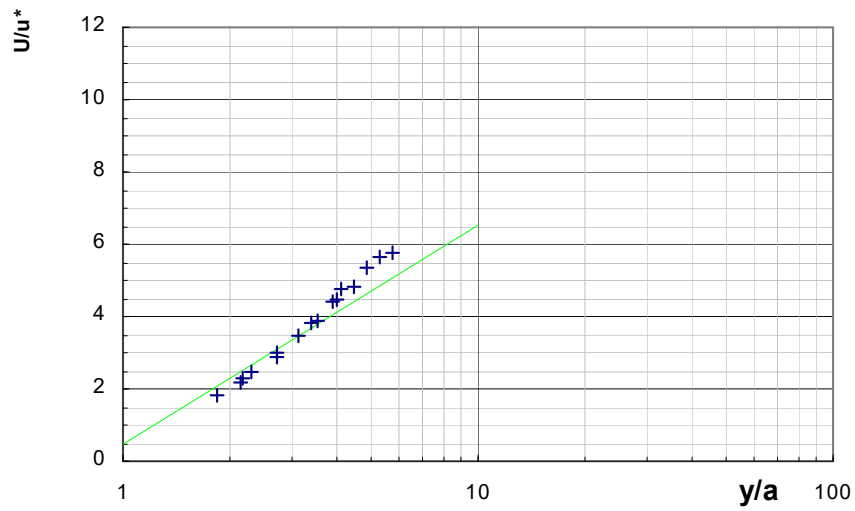


Fig. 5-13: Pontos Experimentais e Modelo Logarítmico - Obstáculos 70 x 70 mm E/a =4

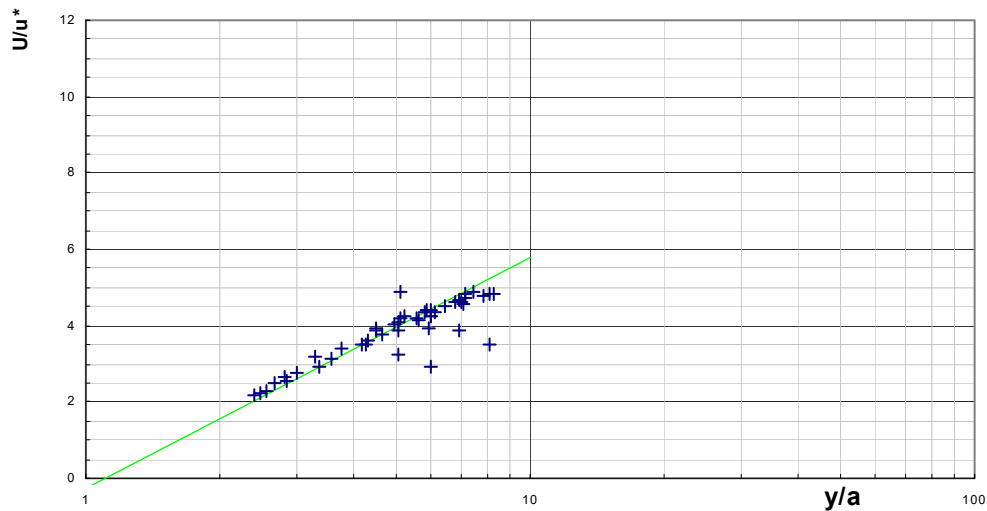


Fig. 5-14: Pontos Experimentais e Modelo Logarítmico - Obstáculos 50x25 mm $E/a = 9$

A falta de aderência nos pontos na parte superior é um indicativo da transição entre o escoamento hiper-turbulento e o turbulento normal, o que significa a redução do efeito ou interferência da macro-rugosidade. Já os desvios para as pequenas relações y/a são indicativos da falta de representatividade do modelo que não considera a variação da espessura da camada de interferência hiper-turbulenta.

5.4 Análise segundo o modelo logarítmico hiper-turbulento

Como contribuição ao tema, apresenta-se a seguir a complementação do modelo logarítmico com a consideração da separação entre a camada de interferência hiper-turbulenta e camada turbulenta normal. Para tal admite-se que a camada de interferência, como proposta por MORRIS e WIGGERT (1972), tem espessura dependente do espaçamento longitudinal E de forma a que seja possível a integração do perfil de velocidades em toda a espessura $[0-h]$ na forma:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{\frac{1}{A} \int_A u dA}{u_*} = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{u}{u_*} dy$$

Admitindo para as leis de velocidade na camada de interferência e na camada turbulenta normal as formas

$$\frac{u}{u_*} = \Psi \ln\left(\frac{y}{E}\right) + A_w$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{E}\right) + A$$

resulta:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{h} \int_0^{cE} \left(\Psi \ln \frac{y}{a} + A_w\right) dy + \frac{1}{h} \int_{cE}^h \left(\frac{1}{k} \ln \frac{y}{a} + A\right) dy$$

Omitindo-se as passagens algébricas obtém-se:

$$\text{Eq. 5-5} \quad \frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{h}{a} - \frac{1}{k} + A + c \frac{E}{h} \left[\left(\ln c \frac{E}{a} - 1 \right) \left(\Psi - \frac{1}{k} \right) + A_w - A \right]$$

Os termos A , A_w , c e Ψ estão associados à geometria da macro-rugosidade, profundidade relativa h/a e Número de Reynolds. A estrutura da Eq. 5-5 é semelhante à da turbulência normal, com o acréscimo do termo cE/h , que indica a espessura relativa da cama de interferência hiper-turbulenta. Na situação onde esta camada inexistente ($c=0$), a lei se reduz à correspondente à turbulência normal.

Ajustando-se o modelo proposto aos dados experimentais obtidos com a macro-rugosidade na forma de travessões de fundo verifica-se que o parâmetro Ψ tem pouca variação com o parâmetro $(E-t)/a$, podendo-se adotar um valor médio em torno de 2,31. Este número é ligeiramente inferior aquele obtido com a constante universal de *von Karman*, da ordem de 2,5. Isto significa que a inclinação da curva representativa dos perfis de velocidade no interior desta camada será ligeiramente mais abatida.

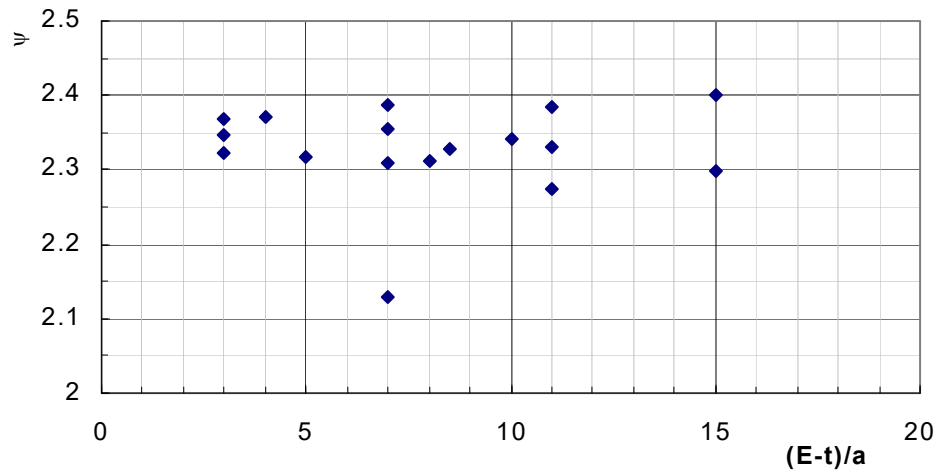


Fig. 5-15: Variação do parâmetro ψ com a geometria da macro-rugosidade

O parâmetro c , que define a espessura da camada de interferência depende do espaçamento relativo $(E-t)/a$ e do fator de forma t/a , reduzindo-se à medida em que se aumenta o espaçamento relativo. Deste modo a espessura da camada hiper-turbulenta é progressivamente menor quanto mais espaçados forem os elementos de fundo.

O parâmetro c pode ser ajustado numericamente ao espaçamento relativo com boa correlação através das equações abaixo, válidas para $(E-t)/a > 3$.

$$\text{Eq. 5-6} \quad c = \frac{1}{(0.1985 + 0.0045 \cdot \left(\frac{E-t}{a}\right)^{2.44}} \quad R^2 = 0.9997 \quad (t/a=1)$$

$$c = \frac{1}{(0.080 + 0.0191 \cdot \left(\frac{E-t}{a}\right)^{2.2.27}} \quad R^2 = 0.9998 \quad (t/a=2)$$

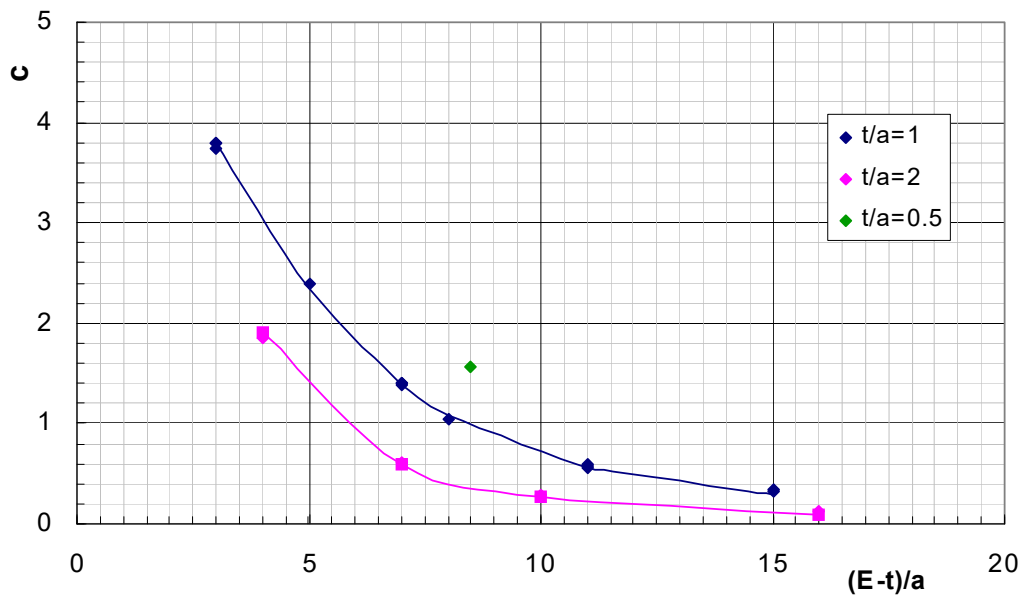


Fig. 5-16: Variação do parâmetro c com o espaçamento relativo $(E-t)/a$

Os parâmetros A e A_w tem comportamento semelhante, apresentando um valor mínimo para a relação $(E-t)/a$ em torno de 7, conclusão esta compatível com aquela estabelecida por KNIGHT e MACDONALD (Fig. 5-17 e Fig. 5-18). A Fig. 5-19, a seguir ilustra o parâmetro de resistência calculado a partir da Eq. 5-5 para diferentes relações E/a , onde se pode verificar o comportamento semelhante aos encontrados nos dados experimentais.

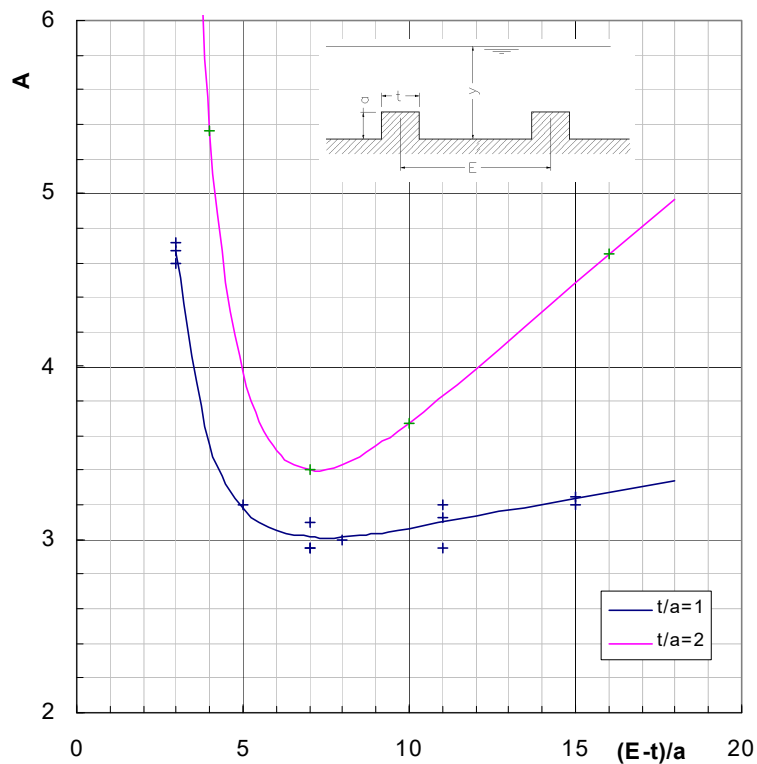


Fig. 5-17: Parâmetro A e função de $(E-t)/a$

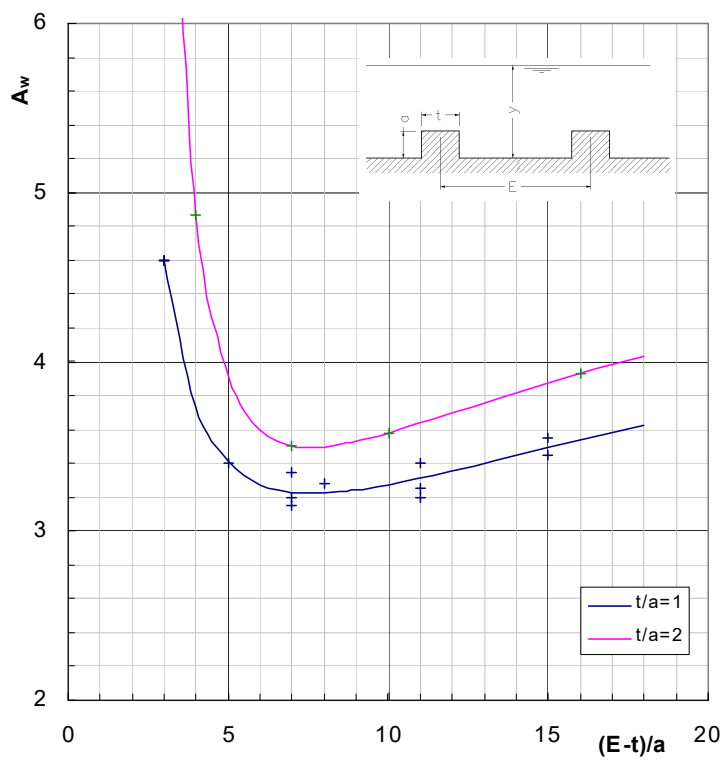


Fig. 5-18: Parâmetro A_w e função de $(E-t)/a$

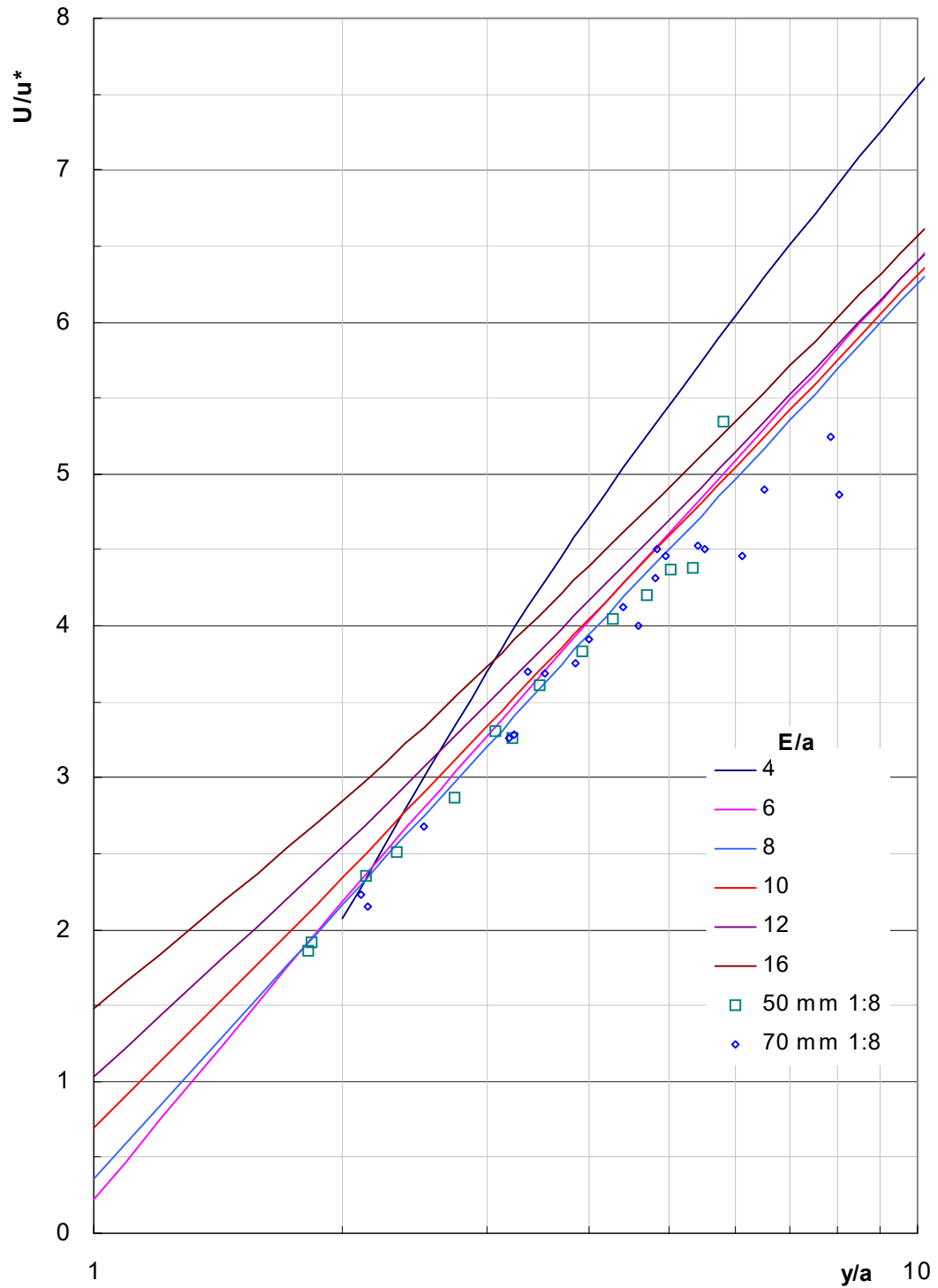


Fig. 5-19: Resistência ao Escoamento calculada com a Eq. 5-5 para $t/a=1$ e pontos experimentais com $E/a=8$

5.5 Análise segundo o modelo de CHIU

De acordo com o fundamento da distribuição probabilística de velocidades de CHIU, o parâmetro M é um indicador da uniformidade das velocidades para uma dada condição do escoamento. CHIU(1982) já havia demonstrado, a partir de dados experimentais abrangentes, a relação direta existente entre as tensões de atrito e a não uniformidade das velocidades através da Eq. 2-37.

Tomando-se o parâmetro M obtido experimentalmente e confrontando-se a relação U/u_{\max} , determinada através da Eq. 2-29, com o parâmetro de resistência U/u_* , afetado pela macro-rugosidade, verifica-se que aquela relação se confirma para a macro-rugosidade, como ilustra a Fig. 5-20 e a Eq. 5-7. Deste modo, pode-se postular que o parâmetro M está relacionado com as características geométricas da macro-rugosidade. Tal procedimento constitui-se numa nova forma de abordagem do problema da macro-rugosidade tendo-se em conta as vantagens da distribuição de CHIU.

$$\text{Eq. 5-7} \quad \frac{u_{\max}}{u_*} = 1.1109 \left(\frac{U}{u_*} \right)^{1.033}$$

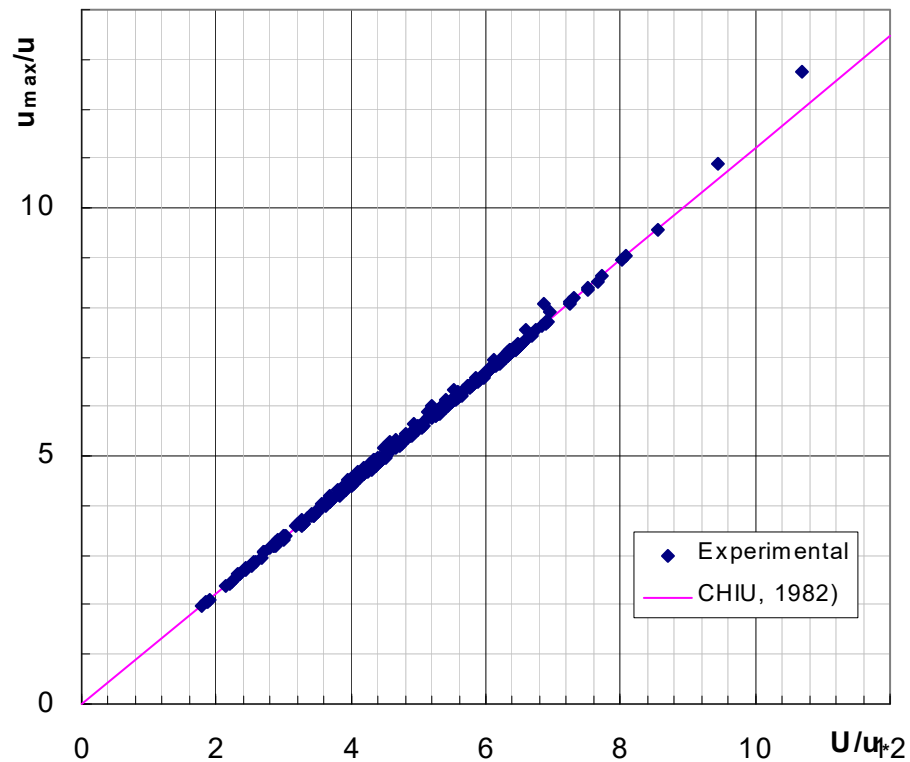


Fig. 5-20: Correlação U_{max} x U_* obtida experimentalmente

Considerando a interpretação apresentada anteriormente, de que distribuição de velocidades será mais uniforme quanto maior a profundidade relativa y/a e quanto mais espaçados se encontrarem os obstáculos em relação a uma mesma profundidade, (um menor quociente y/E), a relação de u_{max}/u_* com estes indicadores estará também ligada ao parâmetro M .

O gráfico Fig. 5-21 mostra a variação dos valores de u_{max}/u_* com y/E , para as diferentes configurações geométricas estudadas, representadas pelo índice E/a . Optou-se pelo lançamento de todos os pontos experimentais obtidos para se visualizar a faixa de variação dos resultados.

As curvas esboçadas indicam que o parâmetro u_{\max}/u^* tende a um valor constante para elevados valores de y/E , o que é compatível com a hipótese de que para altas profundidades relativas as tensões tangenciais independem da macro-rugosidade.

A curva tem uma interessante aplicação prática pois permite a determinação do fator de atrito referente à macro-rugosidade a partir da seleção das características geométricas e hidráulicas (E , a e y). Entrando-se com estes valores pode-se obter U_{\max}/u^* e através da equação indicada na Fig. 5-20 o valor de U/u^* .

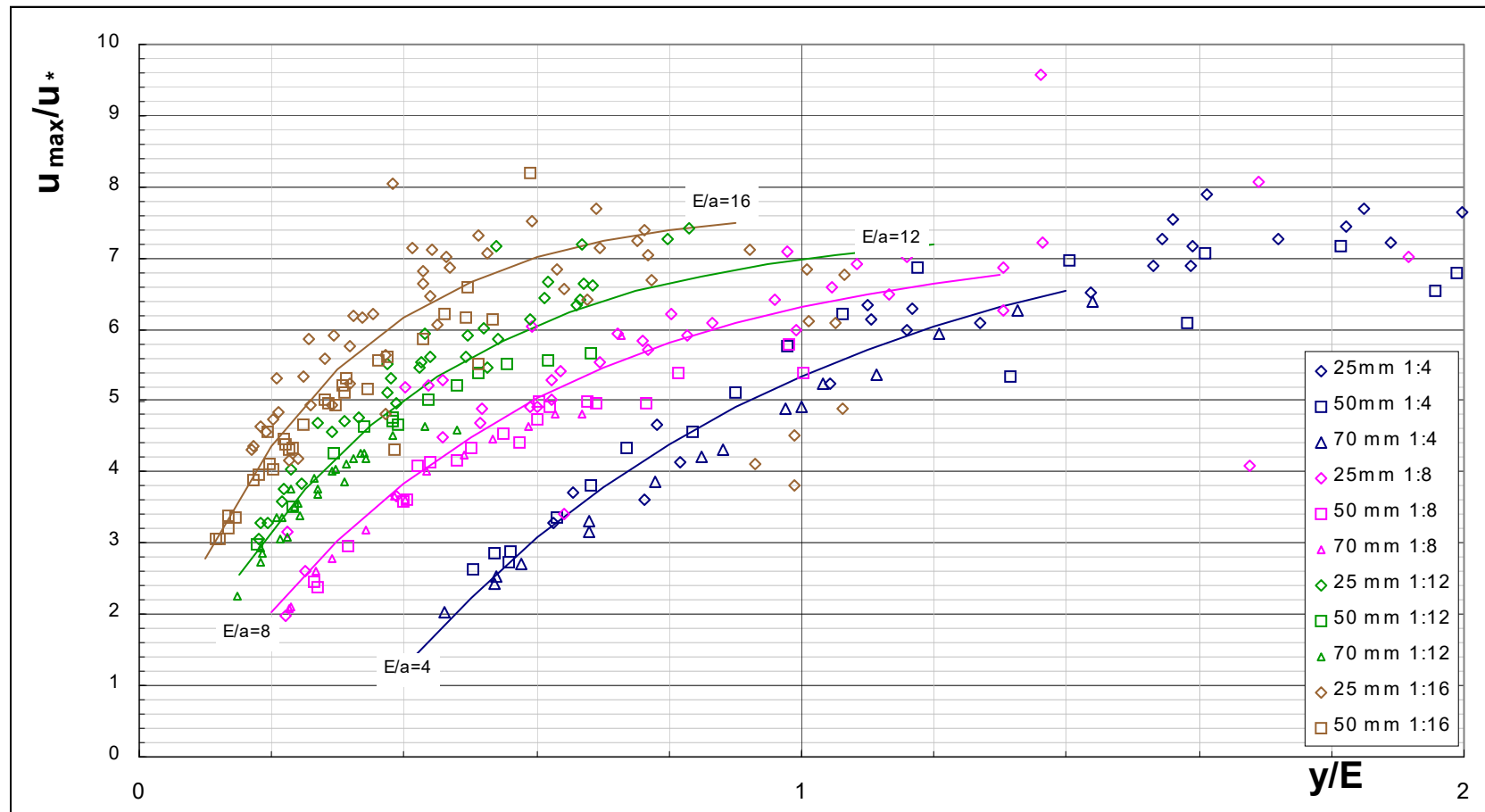


Fig. 5-21: Correlação u_{max} / u_* em função de y/E , para diferentes relações E/a

6 CONCLUSÕES RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

As pesquisas teóricas e os trabalhos experimentais desenvolvidos com vistas ao estudo da macro-rugosidade de fundo em canais, tanto sob o ponto de vista genérico como para sua aplicação prática permitiram a verificação e o estabelecimento de modelos matemáticos capazes de representar com relativa acuracidade o comportamento destes elementos.

Dentre os resultados alcançados destaca-se:

- Pesquisa teórica

Os estudos teóricos permitiram a consolidação de informações para interpretação dos fenômenos ligados à macro-rugosidade, estabelecendo os fundamentos para o desenvolvimento das técnicas aplicadas. Dentre estas informações destaca-se a recuperação do enfoque dado por MORRIS e WIGGERT para a consideração da transição hiper-turbulência – turbulência normal, e que foi aproveitada neste trabalho para o desenvolvimento do equacionamento mais representativo para tratamento da macro-rugosidade.

O estudo e aplicação da teoria do perfil probabilístico de velocidades, baseado na entropia máxima permitiu a introdução de um fato novo no enfoque do assunto resistência ao escoamento. A potencialidade apresentada pelo equacionamento de CHIU, capaz de englobar distribuições de velocidade intensamente não uniformes como as que ocorrem no caso particular da macro-rugosidade de fundo mostrou-se muito atraente e levou a resultados bastante promissores na consolidação do uso desta teoria. Recomenda-se desta forma o prosseguimento de pesquisas na linha da aqui apresentada, visando a estimativa de parâmetros relativos aos diversos fenômenos hidráulicos relacionados a distribuição vertical de velocidades.

A análise dos estudos específicos de diferentes pesquisadores no assunto permitiu estabelecer alguns princípios importantes sobre o tema:

1. o assunto é complexo e vem despertando o interesse dos pesquisadores a cerca de 50 anos. A dificuldade exige, além da dedicação ao estudo e interpretação dos mecanismos teóricos de análise, um intensivo e demorado processo de investigação física com a troca e correlação de dados entre os pesquisadores. Comparando-se trabalhos desenvolvidos na década de 1960 com outros apresentados em 2001 verifica-se que os objetivos continuam sendo o de se buscar a generalização do cálculo das perdas de carga gerada pelos elementos macro-rugosos.
2. metodologias diferentes de enfoque, envolvendo tanto medições diretas das tensões de atrito como indiretas e aproximadas apresentam resultados medianos e com diversos pontos de dispersão, o que indica que os mecanismos teóricos não estão suficientemente desenvolvidos.
3. Diferentes equacionamentos propostos, modelos matemáticos e de correlação de dados mostram-se eficientes quando confrontados com os dados específicos com base nos quais foram desenvolvidos, porém não apresentam grande abertura para uma generalização.
4. A diversidade que pode assumir os arranjos de macro-rugosidade exige que cada caso seja pesquisado de forma objetiva detalhada antes de se atingir uma generalização.
5. Em todos os trabalhos consultados sobre o assunto, não se encontrou nenhuma pesquisa sistemática de avaliação das tensões de atrito que considerasse o escoamento genérico variado no espaço, a não ser em algumas indicações de sua possibilidade e propriedade.

- Metodologia para estudo em laboratório

A metodologia desenvolvida para medição e análise das perdas de carga em canais em movimento permanente e variado no espaço mostrou eficiente e capaz de apresentar resultados precisos, reunindo simplicidade e rapidez. O modelo

matemático para cálculo das tensões de atrito a partir das medições de linha d'água em laboratório também se apresentou como uma nova ferramenta à disposição para uso corrente em pesquisas e trabalhos de campo que requeiram a medição de perdas de carga no escoamento genérico. Destacam-se especialmente os levantamentos de resistência ao escoamento a serem realizados em campo, baseados na determinação do parâmetro M de CHIU.

O modelo físico utilizado para análise das macro-rugosidades, constituído de um canal com paredes de vidro e fundo rugoso sobre o qual se aplicaram os elementos representativos da macro-rugosidade introduz uma significativa componente na resistência, representada pela resistência das paredes laterais. É interessante observar que na maioria dos estudos similares evita-se este problema com simulações em canais com elevada relação B/y . KNIGHT e MACDONALD, que trabalharam com canais relativamente estreitos mostraram que é possível a eliminação do efeito de parede e obtenção de resultados extensíveis ao caso bidimensional mesmo em canais de laboratório com largura reduzida.

Para esta generalização foi necessária a introdução de procedimentos de correção que se mostraram eficazes, quando se constatou a boa correspondência dos dados obtidos com informações similares de outros pesquisadores. Destacam-se os estudos desenvolvidos por BRIGHETTI et All, em canal de grande largura, cujos resultados são totalmente compatíveis.

O canal experimental não permitiu a simulação de relações y/a superiores a 20 e também relações E/y superiores a 20, o que limitou a faixa de interpretação dos resultados.

O aparato mostrou-se limitado entretanto em função da precisão para medição de valores pequenos de perda de carga, principalmente em condições de altas velocidades. Isto se deve tanto ao limite físico da leitura de nível d'água como à dificuldade do processo em si que introduz muitos erros acidentais.

Recomenda-se desta forma, nas futuras pesquisas com a aplicação desta técnica de determinação da resistência ao escoamento, o aprimoramento da forma de medição das profundidades através de instrumentação eletrônica para este fim.

- Modelos de cálculo da macro-rugosidade

Foram testados quatro modelos análise e cálculo das perdas de carga no escoamento com macro-rugosidade, análise esta limitada à extensão dos dados experimentais especialmente obtidos e aqueles disponibilizados por pesquisadores colaboradores.

O modelo de Manning, apesar de sua tradição e praticidade não apresentou uma boa correlação com os elementos geométricos dos travessões de fundo, entretanto ainda assim foi possível o estabelecimento de curvas para definição da rugosidade n em canais com macro-elementos. Ressalta-se que o interesse no modelo de Manning se justifica porque muitos dos modelos matemáticos de cálculo ainda empregam este parâmetro para cálculo da resistência ao escoamento. Uma das vantagens do cálculo através da fórmula de Manning é que se torna possível entender, sem a necessidade de grandes cálculos, quando o efeito dos elementos macro-rugosos é mais intenso e significativo no escoamento.

O modelo da distribuição logarítmica, tradicionalmente utilizado por outros pesquisadores, não se mostra de todo aderente aos pontos experimentais, não permitindo explicar os desvios observados quando a relação y/a se aproxima de 10 ou é inferior a 4. Entretanto a lei logarítmica é extremamente útil pela praticidade e quantidade de dados e análises que foram desenvolvidas com base nela.

A lei padrão desenvolvida por SAYRE e ALBERTSON, e posteriormente investigada por diferentes pesquisadores não se mostra aderente aos dados uma vez que estabelece uma inclinação padrão, correspondente ao termo $(1/k)$, ligeiramente corrigido pelos autores originais. Verificou-se através dos dados experimentais que a medida em que as profundidades diminuem existe uma deformação gerada pela

camada de interferência hiper-turbulenta e que tende a reduzir esta inclinação, em função da relação y/E .

Para a correção deste efeito foi adaptada e testada uma lei de distribuição que considera a transição da hiper-turbulência para a turbulência rugosa normal, mostrando-se bastante compatível com os resultados experimentais.

O modelo da distribuição probabilística de velocidades (CHIU), mostra-se muito apropriado para a quantificação dos efeitos da macro-rugosidade, já que o parâmetro M engloba as principais variáveis intervenientes, como demonstra a correlação estabelecida entre a relação u_{\max}/u^* e a geometria dos elementos de macro-rugosidade.

- A Macro-rugosidade

Confirma-se o comportamento dos travessões de fundo de seção retangular como elemento capaz de aumentar as perdas de carga para y/a inferiores a 8, e praticamente não influir no escoamento para valores desta relação maiores do que 10. O desempenho destes elementos sob condições hidrodinâmicas diferentes daquela do regime uniforme também pôde ser bem caracterizado, confirmando-se a validade da aproximação do regime uniforme para dimensionamento de canais com estas características.

Confirma-se ainda que a máxima interferência dos elementos macro-rugosos no escoamento ocorre para a relação $E/a=8$ e relação E/y inferior a 6. O parâmetro t/a mostrou-se também importante na definição da resistência ao escoamento.

Foram obtidas curvas que podem contribuir nas aplicações práticas de travessões de fundo em canais uma vez que podem ser determinados os parâmetros de resistência ao escoamento para a faixa de profundidades $3 \leq y/a \leq 8$.

Neste campo as pesquisas devem prosseguir visando a caracterização e a estimativa de parâmetros para outras formas geométricas de elementos macro-rugosos, principalmente aquelas compatíveis com métodos construtivos e tecnologias disponíveis na Engenharia.

LISTA DE REFERÊNCIAS

ACKERS, Peter. *Resistance of fluids flowing in channels and pipes.* London: Her Majesty's Stationary Office, 1958. 39p. (Hydraulics Research Paper, 1)

AFZALIMEHR, Hossein & ANCTIL, François. Vitesse de frottement associée à un écoulement non uniforme et une rugosité relative intermédiaire. *JOURNAL of HYDRAULIC RESEARCH, IAHR*, v.39, n.2, p.181-186, 2001.

AGUIRRE, Julian; FUENTES, Ramon & OLIVERO, Maria Luisa. Una formula para la fricción en escurrimientos macro rugosos a superficie libre. *In: CONGRESO LATINOAMERICANO de HIDRAULICA, AIHR, 12º*, São Paulo, SP., Ago./Set.1986. *Anais.* São Paulo, AIRH, 1986. v.1, p.87-103.

BATHURST, James C. Flow resistance of large-scale roughness. *JOURNAL of HYDRAULICS DIVISION, ASCE*, v.104, Ser.HY, n.12, p.1587-1603, Dec.1978.

BRIGHETTI, Giorgio; RUIZ, Murilo D. & PINTO, Delduque P.. Estudo de Macrorugosidades em Canais Navegáveis. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE VIAS NAVEGÁVEIS INTERNAS, 2º*, Jaú, SP., /Set.2001. *Anais.* São Paulo,

CASTILHO, Moisés. *Regularização de Rios a Fundo Fixo Visando sua Navegabilidade.* São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 1998. (Relatório Final, Processo 97/07028-3).

CHIU, Chao-Lin. Application of entropy concept in open-channel flow study. *JOURNAL of HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE*, v.117, n.5, p.615-628, May 1991.

_____. Entropy and 2-D velocity distribution in open channels. *JOURNAL of HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE*, v.114, n.7, p.738-756, July 1988.

_____ ; **SAID Chairil.** Maximum and Mean Velocities and Entropy in Open-Channel Flow. *JOURNAL of HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE*, v.121, n.1, p.26-35, January 1995.

_____ ; **TUNG Ning-Chien.** Maximum Velocity and Regularities in Open-Channel Flow. *JOURNAL of HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE*, v.128, n.4, p.390-398, April 2001.

CHOW, Ven Te. *Open-channel hydraulics.* New York: McGraw-Hill, 1985. 680p.

COLEMAN, Neil L. & ALONSO, Carlos V. Two-dimensional channel flows over rough surfaces. *JOURNAL of HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE*, v.109, n.2, p.175-188, Febr.1981.

FIELD, W.G.; LAMBERT, M.F. & WILLIAMS, B.J. Energy and momentum in one dimensional open channel flow. *JOURNAL of HYDRAULIC RESEARCH, IAHR*, v.36 n.1 p.29-42, 1998.

FORTUNA, Armando de Oliveira. *Técnicas computacionais para dinâmica dos fluídos: conceitos básicos e aplicações.* São Paulo: EDUSP, 2000. 427p.

FRENCH, Richard H. *Open-channel hydraulics.* New York: McGraw-Hill, 1986. 706p.

HENDERSON, F.M. *Open channel flow.* New York: MacMillan, 1966. 522p.

KIRKGOZ, M. Salih. Turbulent velocity profiles for smooth and rough open channel flow. *JOURNAL of HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE*, v.115, n.11, Sept.1988.

KNIGHT, Donald W. & MACDONALD, J. Alasdair. Hydraulic resistance of artificial strip roughness. *JOURNAL of HYDRAULICS DIVISION, ASCE*, v.105, Ser.HY, n.6, p.675-690, Jan. 1978.

_____. _____. Open channel flow with varying bed roughness. *JOURNAL of HYDRAULICS DIVISION, ASCE*, v.105, Ser.HY, n.9, p.1167-1183, Sept.1978.

MARTINS, José R. S. **Hidrodinâmica Bidimensional. Estudo em modelo matemático.** 1989. 443p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

MINEI, Noboru. **Um método expedito para a medição de vazão em rios e canais abertos.** 1999. 124p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo.

MORRIS, H.M., WIGGERT, J.M. *Applied Hydraulics in Engineering. 2a.ed.* John Willey & Sons: MIT Press, 1972. 629p.

O'LOUGHLIN, Emmett M. & ANNAMBHOTLA, V.S. Shastri. Flow phenomena near rough boundaries. *JOURNAL of HYDRAULIC RESEARCH, IAHR*, v.7, n.2, p.231-250, Nov. 1968.

PORTO, Rodrigo de Melo. *Hidráulica básica.* São Carlos: EESC-USP, 1998. 540p.

ROBERSON, John A.; BAJWA, Manjit & WRIGHT, Steven J. A general theory for flow in rough conduits. *JOURNAL of HYDRAULIC RESEARCH, IAHR*, v.12, n.2, p.223-240, 1974.

ROSSO, Maurizio; SCHIARA, Marcelo & BERLAMONT, Jean. Flow stability and friction factor in rough channels. *JOURNAL of HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE*, v.116, n.9, p.1109-1118, Sept.1989.

ROUSE, Hunter. *Fluid mechanics for hydraulic engineering.* New York: Dover, 1961. 422p.

SAYRE, William W. & ALBERTSON, Maurice L. Roughness spacing in rigid open channels. *JOURNAL of HYDRAULICS DIVISION, ASCE*, v.879, Ser.HY, n.3, p.343-427, May 1961.

SHEN, Hsieh W. Analysis of resistance over staggered roughness. *JOURNAL of HYDRAULICS DIVISION, ASCE*, v.99, Ser. HY, n.11, p.2169-2174, Nov.1973.

SOUZA, P.A.; MARTINS, J. R. S. & FADIGA Jr, F. M.. *Métodos Computacionais para Engenharia Hidráulica.* São Paulo: Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos, 1991. 170p.

TUCCI, C.E; PORTO, R. L. & BARROS, M. T. L.. *Drenagem Urbana.* Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. 428p.

WU, S. & RAJARATNAM, N. A simple method for measuring shear stress on rough boundaries. *JOURNAL of HYDRAULIC RESEARCH, IAHR*, v.38, n.5, p.399-400, 2000.

YEN, Ben Chie. Open Channel Flow Resistance. *JOURNAL of HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE*, v.128, n.1, p.20-39, January 2002.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

CASEY, T.J. *Water and wastewater engineering hydraulics.* Oxford, Oxford University Press, 1992. 270p.

FOGIEL, M. *The essential of transport phenomena.* New York: Research and Education Association, 1987. 79p.

_____. *The essentials of fluid mechanics and dynamics.* New York: Research and Education Association, 1987. 2v.

GONCHAROV, V.N. *Dynamics of channel flow.* Leningrad: GIMIZ, 1964. 317p.

HAMM, P. Généralisation des équations de Saint-Venant avec profils de vitesses et contraintes. *JOURNAL of HYDRAULIC RESEARCH, IAHR*, v.34, n.4, p.481-501, 1996.

LAMB, H. *Hydrodynamics.* Cambridge: Cambridge University Press, 1932. 738p.

LENCASTRE, Armando. *Manual de hidráulica geral.* São Paulo: EDUSP/Edgard Blücher, 1972. 411p.

MYERS, W.R.C.; LYNESS, J.F. & CASSELLS, J.. Influence of boundary roughness on velocity and discharge in compound river channels. *JOURNAL OF HYDRAULIC RESEARCH, IARH*, v. 39, no. 3, p.311-319, 2001.

NIKORA, Vladimir ; GORING, Derek; MCEWAN, Ian & and GRIFFITHS, George. Spatially Averaged Open-Channel Flow over Rough Bed. *JOURNAL of HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE*, v. 127, n.2, p.123-133, Feb. 2001.

PARADINE, C.G. & RIVETT, B.H. *Métodos Estatísticos para Tecnologistas.*
Trad. Miguel César Santoro. São Paulo: Polígono/ Editora da Universidade de São Paulo, 1974. 350p.

RHODES, David G. & SENIOR, Alastair K. Numerical study of resistance with rib roughness of various scales. *JOURNAL of HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE*, v.126, n.7, p.541-546, Jul. 2000.

TENNEKES, H. & LUMLEY, J.L. *A first course in turbulence. 7a.ed.*
Cambridge: MIT Press, 1981. 300p.

APÊNDICE A

Apresenta-se a seguir os dados levantados por BRIGHETTI et Alli (2001) referentes ao estudo de macro-rugosidade de fundo desenvolvido em modelo reduzido para aplicação no Canal da Hidrovia do Araguaia.

Seg	Ens	a (cm)	t (cm)	E(cm)	Decliv	a/E	a/t	Q (m ³ /s)	h (m)	V(m/s)	Rey	Froude	U/u _* =C/√g
1	49	2.5	10	25	0.04%	1/10	1/4	0.0491	0.1318	0.186	97228	0.16	8.73
2	50	2.5	10	25	0.04%	1/10	1/4	0.0697	0.1617	0.216	138020	0.17	9.24
3	51	2.5	10	25	0.04%	1/10	1/4	0.0904	0.1840	0.246	179010	0.18	9.96
4	52	2.5	10	25	0.04%	1/10	1/4	0.1096	0.2081	0.263	217030	0.18	10.14
5	37	2.5	10	20	0.04%	1/8	1/4	0.0511	0.1284	0.199	101188	0.18	9.43
6	38	2.5	10	20	0.04%	1/8	1/4	0.0709	0.1527	0.232	140396	0.19	10.20
7	39	2.5	10	20	0.04%	1/8	1/4	0.0901	0.1757	0.256	178416	0.20	10.60
8	40	2.5	10	20	0.04%	1/8	1/4	0.1092	0.2029	0.269	216238	0.19	10.48
9	21	2.5	5	25	0.04%	1/10	1/2	0.0497	0.1487	0.167	98416	0.14	7.43
10	22	2.5	5	25	0.04%	1/10	1/2	0.0698	0.1730	0.202	138218	0.16	8.40
11	23	2.5	5	25	0.04%	1/10	1/2	0.0894	0.1985	0.225	177030	0.16	8.85
12	24	2.5	5	25	0.04%	1/10	1/2	0.1109	0.2182	0.254	219604	0.17	9.60
13	109	5	10	50	0.04%	1/10	1/2	0.0489	0.1420	0.172	96832	0.15	7.81
14	110	5	10	50	0.04%	1/10	1/2	0.0698	0.1804	0.193	138218	0.15	7.91
15	111	5	10	50	0.04%	1/10	1/2	0.0850	0.1970	0.216	168317	0.16	8.50
16	112	5	10	50	0.04%	1/10	1/2	0.1091	0.2243	0.243	216040	0.16	9.08
17	137	7.5	15	70	0.04%	3/28	1/2	0.0483	0.1420	0.170	95644	0.14	7.71
18	138	7.5	15	70	0.04%	3/28	1/2	0.0701	0.1837	0.191	138812	0.14	7.74
19	139	7.5	15	70	0.04%	3/28	1/2	0.0892	0.2203	0.202	176634	0.14	7.62
20	140	7.5	15	70	0.04%	3/28	1/2	0.1095	0.2450	0.223	216832	0.14	8.05
21	9	2.5	5	20	0.04%	1/8	1/2	0.0501	0.1316	0.190	99208	0.17	8.92
22	10	2.5	5	20	0.04%	1/8	1/2	0.0717	0.1610	0.223	141980	0.18	9.56
23	11	2.5	5	20	0.04%	1/8	1/2	0.0893	0.1862	0.240	176832	0.18	9.68
24	12	2.5	5	20	0.04%	1/8	1/2	0.1101	0.2092	0.263	218020	0.18	10.11
25	97	5	10	40	0.04%	1/8	1/2	0.0512	0.1486	0.172	101386	0.14	7.66
26	98	5	10	40	0.04%	1/8	1/2	0.0696	0.1773	0.196	137822	0.15	8.09
27	99	5	10	40	0.04%	1/8	1/2	0.0894	0.2040	0.219	177030	0.16	8.51
28	100	5	10	40	0.04%	1/8	1/2	0.1103	0.2295	0.240	218416	0.16	8.89
29	125	7.5	15	60	0.04%	1/8	1/2	0.0505	0.1525	0.166	100000	0.14	7.28
30	126	7.5	15	60	0.04%	1/8	1/2	0.0703	0.1834	0.192	139208	0.14	7.78
31	127	7.5	15	60	0.04%	1/8	1/2	0.0893	0.2329	0.192	176832	0.13	7.05
32	128	7.5	15	60	0.04%	1/8	1/2	0.1027	0.2395	0.214	203366	0.14	7.80
33	81	5	5	50	0.04%	1/10	1	0.0506	0.1653	0.153	100198	0.12	6.50
34	82	5	5	50	0.04%	1/10	1	0.0696	0.1887	0.184	137822	0.14	7.40
35	83	5	5	50	0.04%	1/10	1	0.0902	0.2173	0.208	178614	0.14	7.85
36	84	5	5	50	0.04%	1/10	1	0.1103	0.2366	0.233	218416	0.15	8.52
37	69	5	5	40	0.04%	1/8	1	0.0497	0.1524	0.163	98416	0.13	7.17
38	70	5	5	40	0.04%	1/8	1	0.0696	0.1880	0.185	137822	0.14	7.44
39	71	5	5	40	0.04%	1/8	1	0.0898	0.2234	0.201	177822	0.14	7.52
40	72	5	5	40	0.04%	1/8	1	0.1099	0.2341	0.235	217624	0.16	8.62
41	149	Liso	Liso	Liso	0.04%			0.0505	0.0804	0.314	100000	0.35	18.41

Seg	Ens	a (cm)	t (cm)	E(cm)	Decliv	a/E	a/t	Q (m³/s)	h (m)	V(m/s)	Rey	Froude	U/u _* =C/√g
42	150				0.04%			0.0692	0.1010	0.343	137030	0.34	18.08
43	151				0.04%			0.0897	0.1206	0.372	177624	0.34	18.12
44	152				0.04%			0.1093	0.1395	0.392	216436	0.34	17.90
45	45	2.5	10	25	0.07%	1/10	1/4	0.0498	0.1090	0.228	98614	0.22	8.81
46	46	2.5	10	25	0.07%	1/10	1/4	0.0694	0.1341	0.259	137426	0.23	9.09
47	47	2.5	10	25	0.07%	1/10	1/4	0.0913	0.1629	0.280	180792	0.22	9.05
48	48	2.5	10	25	0.07%	1/10	1/4	0.1109	0.1809	0.307	219604	0.23	9.47
49	33	2.5	10	20	0.07%	1/8	1/4	0.0507	0.1200	0.211	100396	0.20	7.80
50	34	2.5	10	20	0.07%	1/8	1/4	0.0696	0.1348	0.258	137822	0.22	9.05
51	35	2.5	10	20	0.07%	1/8	1/4	0.0908	0.1568	0.290	179802	0.23	9.50
52	36	2.5	10	20	0.07%	1/8	1/4	0.1104	0.1747	0.316	218614	0.24	9.90
53	17	2.5	5	25	0.07%	1/10	1/2	0.0482	0.1265	0.191	95446	0.17	6.87
54	18	2.5	5	25	0.07%	1/10	1/2	0.0712	0.1438	0.248	140990	0.21	8.44
55	19	2.5	5	25	0.07%	1/10	1/2	0.0940	0.1678	0.280	186139	0.22	8.93
56	20	2.5	5	25	0.07%	1/10	1/2	0.1092	0.1875	0.291	216238	0.22	8.86
57	105	5	10	50	0.07%	1/10	1/2	0.0500	0.1300	0.192	99010	0.17	6.85
58	106	5	10	50	0.07%	1/10	1/2	0.0704	0.1518	0.232	139406	0.19	7.72
59	107	5	10	50	0.07%	1/10	1/2	0.0898	0.1755	0.256	177822	0.20	8.00
60	108	5	10	50	0.07%	1/10	1/2	0.1094	0.2001	0.273	216634	0.20	8.09
61	133	7.5	15	70	0.07%	3/28	1/2	0.0498	0.1298	0.192	98614	0.17	6.84
62	134	7.5	15	70	0.07%	3/28	1/2	0.0699	0.1618	0.216	138416	0.17	7.00
63	135	7.5	15	70	0.07%	3/28	1/2	0.0909	0.1868	0.243	180000	0.18	7.41
64	136	7.5	15	70	0.07%	3/28	1/2	0.1089	0.2068	0.263	215644	0.19	7.69
65	5	2.5	5	20	0.07%	1/8	1/2	0.0519	0.1198	0.217	102772	0.20	8.00
66	6	2.5	5	20	0.07%	1/8	1/2	0.0654	0.1367	0.239	129505	0.21	8.34
67	7	2.5	5	20	0.07%	1/8	1/2	0.0892	0.1710	0.261	176634	0.20	8.25
68	8	2.5	5	20	0.07%	1/8	1/2	0.1089	0.1886	0.289	215644	0.21	8.76
69	93	5	10	40	0.07%	1/8	1/2	0.0515	0.1288	0.200	101980	0.18	7.15
70	94	5	10	40	0.07%	1/8	1/2	0.0696	0.1514	0.230	137822	0.19	7.66
71	95	5	10	40	0.07%	1/8	1/2	0.0891	0.1760	0.253	176436	0.19	7.91
72	96	5	10	40	0.07%	1/8	1/2	0.1084	0.2002	0.271	214653	0.19	8.01
73	121	7.5	15	60	0.07%	1/8	1/2	0.0498	0.1380	0.180	98614	0.16	6.26
74	122	7.5	15	60	0.07%	1/8	1/2	0.0695	0.1614	0.215	137624	0.17	6.98
75	123	7.5	15	60	0.07%	1/8	1/2	0.0893	0.1858	0.240	176832	0.18	7.34
76	124	7.5	15	60	0.07%	1/8	1/2	0.1092	0.2115	0.258	216238	0.18	7.47
77	77	5	5	50	0.07%	1/10	1	0.0529	0.1385	0.191	104752	0.16	6.62
78	78	5	5	50	0.07%	1/10	1	0.0702	0.1632	0.215	139010	0.17	6.94
79	79	5	5	50	0.07%	1/10	1	0.0894	0.1906	0.235	177030	0.17	7.08
80	80	5	5	50	0.07%	1/10	1	0.1098	0.2124	0.258	217426	0.18	7.46
81	65	5	5	40	0.07%	1/8	1	0.0508	0.1435	0.177	100594	0.15	6.04
82	66	5	5	40	0.07%	1/8	1	0.0724	0.1643	0.220	143366	0.17	7.09
83	67	5	5	40	0.07%	1/8	1	0.0911	0.1878	0.243	180396	0.18	7.37
84	68	5	5	40	0.07%	1/8	1	0.1106	0.2085	0.265	219010	0.19	7.72
85	145	Liso	Liso	Liso	0.07%			0.0562	0.0698	0.403	111287	0.49	19.05
86	146				0.07%			0.0697	0.0806	0.432	138020	0.49	19.13
87	147				0.07%			0.0889	0.0915	0.486	176040	0.51	20.28
88	148				0.07%			0.1085	0.1080	0.502	214851	0.49	19.45
89	53	2.5	10	30	0.10%	1/12	1/4	0.0495	0.1035	0.239	98020	0.24	7.90
90	54	2.5	10	30	0.10%	1/12	1/4	0.0698	0.1237	0.282	138218	0.26	8.60
91	55	2.5	10	30	0.10%	1/12	1/4	0.0902	0.1416	0.319	178614	0.27	9.14

Seg	Ens	a (cm)	t (cm)	E(cm)	Decliv	a/E	a/t	Q (m³/s)	h (m)	V(m/s)	Rey	Froude	U/u _* =C/√g
92	56	2.5	10	30	0.10%	1/12	1/4	0.1109	0.1667	0.333	219604	0.26	8.90
93	41	2.5	10	25	0.10%	1/10	1/4	0.0501	0.1036	0.242	99208	0.24	7.98
94	42	2.5	10	25	0.10%	1/10	1/4	0.0691	0.1293	0.267	136832	0.24	7.99
95	43	2.5	10	25	0.10%	1/10	1/4	0.0901	0.1500	0.300	178416	0.25	8.41
96	44	2.5	10	25	0.10%	1/10	1/4	0.1097	0.1689	0.325	217228	0.25	8.64
97	29	2.5	10	20	0.10%	1/8	1/4	0.0508	0.1034	0.246	100594	0.24	8.11
98	30	2.5	10	20	0.10%	1/8	1/4	0.0695	0.1223	0.284	137624	0.26	8.70
99	31	2.5	10	20	0.10%	1/8	1/4	0.0900	0.1480	0.304	178218	0.25	8.56
100	32	2.5	10	20	0.10%	1/8	1/4	0.1112	0.1684	0.330	220198	0.26	8.79
101	25	2.5	5	30	0.10%	1/12	1/2	0.0506	0.1067	0.237	100198	0.23	7.72
102	26	2.5	5	30	0.10%	1/12	1/2	0.0696	0.1318	0.264	137822	0.23	7.82
103	27	2.5	5	30	0.10%	1/12	1/2	0.0907	0.1543	0.294	179604	0.24	8.13
104	28	2.5	5	30	0.10%	1/12	1/2	0.1107	0.1742	0.318	219208	0.24	8.34
105	113	5	10	60	0.10%	1/12	1/2	0.0516	0.1262	0.204	102178	0.18	6.18
106	114	5	10	60	0.10%	1/12	1/2	0.0695	0.1457	0.239	137624	0.20	6.76
107	115	5	10	60	0.10%	1/12	1/2	0.0900	0.1717	0.262	178218	0.20	6.92
108	116	5	10	60	0.10%	1/12	1/2	0.1100	0.1942	0.283	217822	0.21	7.10
109	13	2.5	5	25	0.10%	1/10	1/2	0.0509	0.1123	0.227	100792	0.22	7.21
110	14	2.5	5	25	0.10%	1/10	1/2	0.0699	0.1319	0.265	138416	0.23	7.85
111	15	2.5	5	25	0.10%	1/10	1/2	0.0901	0.1558	0.289	178416	0.23	7.96
112	16	2.5	5	25	0.10%	1/10	1/2	0.1107	0.1716	0.323	219208	0.25	8.52
113	101	5	10	50	0.10%	1/10	1/2	0.0505	0.1242	0.203	100000	0.18	6.18
114	102	5	10	50	0.10%	1/10	1/2	0.0692	0.1430	0.242	137030	0.20	6.92
115	103	5	10	50	0.10%	1/10	1/2	0.0895	0.1690	0.265	177228	0.21	7.04
116	104	5	10	50	0.10%	1/10	1/2	0.1108	0.1978	0.280	219406	0.20	6.97
117	129	7.5	15	70	0.10%	3/28	1/2	0.0500	0.1235	0.202	99010	0.18	6.17
118	130	7.5	15	70	0.10%	3/28	1/2	0.0727	0.1543	0.236	143960	0.19	6.52
119	131	7.5	15	70	0.10%	3/28	1/2	0.0905	0.1803	0.251	179208	0.19	6.49
120	132	7.5	15	70	0.10%	3/28	1/2	0.1110	0.1987	0.279	219802	0.20	6.94
121	1	2.5	5	20	0.10%	1/8	1/2	0.0498	0.1120	0.222	98614	0.21	7.08
122	2	2.5	5	20	0.10%	1/8	1/2	0.0703	0.1375	0.256	139208	0.22	7.43
123	3	2.5	5	20	0.10%	1/8	1/2	0.0901	0.1570	0.287	178416	0.23	7.88
124	4	2.5	5	20	0.10%	1/8	1/2	0.1130	0.1763	0.320	223762	0.24	8.37
125	89	5	10	40	0.10%	1/8	1/2	0.0504	0.1218	0.207	99802	0.19	6.35
126	90	5	10	40	0.10%	1/8	1/2	0.0696	0.1487	0.234	137822	0.19	6.58
127	91	5	10	40	0.10%	1/8	1/2	0.0870	0.1735	0.251	172277	0.19	6.59
128	92	5	10	40	0.10%	1/8	1/2	0.1113	0.1923	0.289	220396	0.21	7.29
129	117	7.5	15	60	0.10%	1/8	1/2	0.0498	0.1215	0.205	98614	0.19	6.30
130	118	7.5	15	60	0.10%	1/8	1/2	0.0703	0.1513	0.232	139208	0.19	6.48
131	119	7.5	15	60	0.10%	1/8	1/2	0.0903	0.1702	0.265	178812	0.21	7.03
132	120	7.5	15	60	0.10%	1/8	1/2	0.1099	0.1953	0.281	217624	0.20	7.04
133	85	5	5	60	0.10%	1/12	1	0.0500	0.1220	0.205	99010	0.19	6.28
134	86	5	5	60	0.10%	1/12	1	0.0705	0.1456	0.242	139604	0.20	6.87
135	87	5	5	60	0.10%	1/12	1	0.0907	0.1739	0.261	179604	0.20	6.85
136	88	5	5	60	0.10%	1/12	1	0.1106	0.1993	0.277	219010	0.20	6.88
137	73	5	5	50	0.10%	1/10	1	0.0504	0.1255	0.201	99802	0.18	6.08
138	74	5	5	50	0.10%	1/10	1	0.0710	0.1554	0.228	140594	0.19	6.30
139	75	5	5	50	0.10%	1/10	1	0.0903	0.1828	0.247	178812	0.18	6.35
140	76	5	5	50	0.10%	1/10	1	0.1098	0.2003	0.274	217426	0.20	6.78
141	61	5	5	40	0.10%	1/8	1	0.0506	0.1350	0.187	100198	0.16	5.49

Seg	Ens	a (cm)	t (cm)	E(cm)	Decliv	a/E	a/t	Q (m ³ /s)	h (m)	V(m/s)	Rey	Froude	U/u _* =C/√g
142	62	5	5	40	0.10%	1/8	1	0.0703	0.1586	0.222	139208	0.18	6.06
143	63	5	5	40	0.10%	1/8	1	0.0898	0.1810	0.248	177822	0.19	6.41
144	64	5	5	40	0.10%	1/8	1	0.1097	0.2009	0.273	217228	0.19	6.75
145	57	5	5	30	0.10%	1/6	1	0.0492	0.1255	0.196	97426	0.18	5.94
146	58	5	5	30	0.10%	1/6	1	0.0702	0.1541	0.228	139010	0.19	6.30
147	59	5	5	30	0.10%	1/6	1	0.0896	0.1773	0.253	177426	0.19	6.58
148	60	5	5	30	0.10%	1/6	1	0.1103	0.2068	0.267	218416	0.19	6.51
149	141	Liso	Liso	Liso	0.10%			0.0499	0.0643	0.388	98812	0.49	15.96
150	142				0.10%			0.0698	0.0800	0.436	138218	0.49	16.21
151	143				0.10%			0.0910	0.0915	0.497	180198	0.53	17.37
152	144				0.10%			0.1095	0.1040	0.526	216832	0.52	17.34

APÊNDICE B

Apresenta-se a seguir a listagem da rotina principal de cálculo da linha d'água apresentada no Capítulo 4.

Módulo de Declarações

```
Attribute VB_Name = "Reman_Tese"
Option Explicit
Global Const g = 9.78
```

Função para cálculo do fator de atrito F genérico

```
Function F(k As Double, c1 As Double, c2 As Double, y As Double, Re As
Double) As Double
Dim i As Integer
Dim F0 As Double

F0 = 0.02
Do
    F = (-2.03 * Log(c1 / Re / Sqr(F0) + k / c2 / y) / Log(10#)) ^ (-2)
    If Abs(F - F0) < 0.0001 Then Exit Do
    F0 = F
Loop

End Function
```

Função para cálculo do fator de atrito F genérico

```
Function Sf(Tipo As String, Q As Double, k As Double, a As Double, ByVal Rh
As Double, Rey As Double, _
c1 As Double, c2 As Double) As Double
Dim i As Integer, fo As Double, fc As Double
Dim eal As Double, nf As Double

Select Case Tipo
    Case Is = "M" 'Modelo Manning Genérico
        nf = 0.012
        fo = (8 * g / ((Rh) ^ c1 / k) ^ 2) / (2 * a / 0.5) + _
            (8 * g / ((Rh) ^ c1 / nf) ^ 2) / (0.5)
        fo = fo * (0.5 + 2 * a / 0.5)
        Sf = fo * (Q / a) ^ 2 / (8 * g * Rh)
    Case Is = "Man" 'Modelo Manning Tradicional
        fo = (8 * g / ((Rh) ^ c1 / k) ^ 2)
        Sf = fo * (Q / a) ^ 2 / (8 * g * Rh)
    Case Is = "Mf" 'Modelo Manning sem o efeito de parede
        fo = F(0.123 / 1000, 2.51, 14.8, (a / 0.5) / 2, Q / a * 4 * (a / 0.5
/ 2) / fNi(23))
        fo = (8 * g / ((a / 0.5) ^ c1 / k) ^ 2) * 0.5 + fo * (2 * a / 0.5)
        fo = fo / (0.5 + 2 * a / 0.5)
        Sf = fo * (Q / a) ^ 2 / (8 * g * Rh)
    Case Is = "Transi" 'Modelo Fórmula Universal c/ Transição
        fo = 0.03
        For i = 1 To 5: fo = (-2.03 * Log(c1 / Rey / Sqr(fo) + k / Rh / c2)
/ Log(10)) ^ (-2): Next i
        Sf = Q ^ 2 / (8 * g * a ^ 2 * Rh / fo)
    Case Is = "Rparede" 'Modelo Fórmula Universal sem Efeito de Parede
        'fo = ((c1 * Log((A / 0.5) / k)) ^ -2) / (A / 0.5) + F(5.9 / 1000,
2.51, 14.8, 0.8 * Rh, Rey) / 0.5
```

```

fo = F(0.123 / 1000, 2.51, 14.8, (a / 0.5) / 2, Q / a * 4 * (a / 0.5
/ 2) / fNi(23))
fo = ((c1 * Log((a / 0.5) / k)) ^ -2) * (0.5) + fo * (2 * a / 0.5)
fo = fo / (0.5 + 2 * a / 0.5)
Sf = fo * (Q / a) ^ 2 / (8 * g * Rh)
Case Is = "Chiu" 'Modelo de CHIU
eal = ((k * Exp(k) - Exp(k) + 1) / (Exp(k) - 1) ^ 2) / (Q / a)
Sf = fNi(25) / eal / (a / 0.5) / g / Rh
Case Is = "Chiu_Parede" 'Modelo de CHIU sem efeito de parede
fo = F(0.123 / 1000, 2.51, 14.8, (a / 0.5) / 2, Q / a * 4 * (a / 0.5
/ 2) / fNi(23))
eal = ((k * Exp(k) - Exp(k) + 1) / (Exp(k) - 1) ^ 2) / (Q / a)
fc = 8 * fNi(25) / eal / (a / 0.5) / (Q / a) ^ 2
fo = (fc * 0.5 + fo * (2 * a / 0.5)) / (0.5 + 2 * a / 0.5)
Sf = fo * (Q / a) ^ 2 / (8 * g * Rh)
End Select

End Function

```

Função para ajuste da linha d'água utilizando o modelo GRG2 Solver

```

Sub Ajusta()
Dim r As Range

Set r = Selection
If r.Cells.Value <> "Ensaio" Then
MsgBox "Ponto fora de lugar!", vbOKOnly, "Atenção"
Exit Sub
End If
SolverReset
SolverOptions iterations:=1000, precision:=0.00000001,
AssumeLinear:=False, _
IntTolerance:=0.0001, Convergence:=0.0000001, AssumeNonNeg:=True
SolverOK SetCell:=r.Item(7, 7), MaxMinVal:=2, ValueOf:="0",
ByChange:=r.Item(6, 7).Address() + _
" :" + r.Item(6, 8).Address()
SolverAdd CellRef:=r.Item(6, 7).Address(), Relation:=3,
formulatext:="0.04"
SolverSolve Userfinish:=True
SolverReset
SolverOptions iterations:=1000, precision:=0.00000001,
AssumeLinear:=False, _
IntTolerance:=0.0001, Convergence:=0.0000001, AssumeNonNeg:=True
SolverOK SetCell:=r.Item(9, 7), MaxMinVal:=2, ValueOf:="0",
ByChange:=r.Item(8, 7).Address() + _
" :" + r.Item(8, 8).Address()
SolverAdd CellRef:=r.Item(8, 7).Address(), Relation:=3,
formulatext:="0.05"
SolverSolve Userfinish:=True
SolverReset
SolverOptions iterations:=1000, precision:=0.0000000001,
AssumeLinear:=False, _
IntTolerance:=0.0001, Convergence:=0.000000001, AssumeNonNeg:=True
SolverOK SetCell:=r.Item(20, 7), MaxMinVal:=2, ValueOf:="0",
ByChange:=r.Item(19, 7).Address() + _
" :" + r.Item(19, 8).Address()
SolverAdd CellRef:=r.Item(19, 7).Address(), Relation:=3,
formulatext:=".05"
SolverSolve Userfinish:=True
r.Select
ListaEnsaio
r.Select

```

End Sub

Função para reunir os dados na planilha Excel

```

Sub ListaEnsaio()
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, L As Integer, linha As Integer
Dim r As Range, s As Range
Dim arqplan As String
Dim yk As Double, kk As Double
Dim a As Single, E As Single

    Set r = Range("a1")

    arqplan = "[" + r.Cells(1, 10).Text + "]" + r.Cells(1, 12).Text + "!" +
r.Cells(1, 14).Text
    k = r.Cells(1, 15).Value
    a = r.Cells(1, 2).Value
    E = r.Cells(1, 5).Value

    Set s = Range(arqplan)      "[Listagem.xls]Plan1!a2")
    Set r = Selection
    If r.Cells.Value <> "Ensaio" Then
        MsgBox "Ponto fora de lugar!", vbOKOnly, "Atenção"
        Exit Sub
    End If

    L = 4

    j = 0
    With s
        i = r.Cells(1, 2).Value
        linha = (i - k)
        incr j:                               'Sequencial
        incr j: .Cells(linha, j) = i           'No. Ensaio
        incr j: .Cells(linha, j) = r.Cells(1, 6).Value 'Decliv
        incr j: .Cells(linha, j) = r.Cells(1, 9).Value 'Temperatura
        incr j: .Cells(linha, j) = a           'altura elemento
    a
        incr j: .Cells(linha, j) = E           'espaçamento E
        incr j: .Cells(linha, j) = r.Cells(1, 4).Value 'Vazão

        yk = (r.Cells(8, L).Value - r.Cells(3, L).Value)
        incr j: .Cells(linha, j) = yk         'Profundidade
    Sec. 1
        incr j: .Cells(linha, j) = (r.Cells(12, L).Value) 'Rh SEc. 1
        incr j: .Cells(linha, j) = (r.Cells(13, L).Value) 'Vel Sec. 1
        incr j: .Cells(linha, j) = (r.Cells(14, L).Value) 'Reynolds
        incr j: .Cells(linha, j) = (r.Cells(15, L).Value) 'Froud
        incr j: .Cells(linha, j) = r.Cells(4, 7).Value   ' Prof Norm
        incr j: .Cells(linha, j) = r.Cells(5, 7).Value   ' Prof Crítc
        incr j: .Cells(linha, j) = (r.Cells(7, 8).Value)  ' Correlação
        incr j: .Cells(linha, j) = (r.Cells(12, 7).Value) ' dy/dx

        kk = r.Cells(6, 8).Value
        incr j: .Cells(linha, j) = kk           'K
        incr j: .Cells(linha, j) = r.Cells(8, 8).Value / 1000 'n
    Manning
        incr j: If a > 0 Then .Cells(linha, j) = yk / a * 1000 'Y/a
        incr j: If kk > 0 Then .Cells(linha, j) = yk / kk * 1000 'Y/k
        incr j: .Cells(linha, j) = r.Cells(19, 8).Value / 1000 'M Chiu
        incr j:                                     ' 1/f1/2
        incr j: .Cells(linha, j) = r.Cells(18, L).Value    'U/u*

```

```
End With
```

```
End Sub
```

Função para desenhar o gráfico da linha d'água ajustada

```
Sub GrafLdagEnsaio()
Dim r As Range
Dim s As Range
Dim nome, nomeg As Variant

    nome = ActiveSheet.Name

    Set r = Selection
    If r.Cells.Value <> "Ensaio" Then
        MsgBox "Ponto fora de lugar!", vbOKOnly, "Atenção"
        Exit Sub
    End If
    Set s = Range(r.Item(2, 2).Address() + ":" + r.Item(2, 6).Address() +
Chr(44) + _
        r.Item(5, 2).Address() + ":" + r.Item(5, 6).Address() +
Chr(44) + _
        r.Item(6, 2).Address() + ":" + r.Item(6, 6).Address() +
Chr(44) + _
        r.Item(8, 2).Address() + ":" + r.Item(8, 6).Address() +
Chr(44) + _
        r.Item(19, 2).Address() + ":" + r.Item(19, 6).Address())
    Charts.Add
    ActiveChart.ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
    ActiveChart.SetSourceData Source:=s, PlotBy:=xlRows
    ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsObject, Name:=nome

    With ActiveChart.PlotArea.Border
        .Weight = xlThin
        .LineStyle = xlAutomatic
    End With
    ActiveChart.PlotArea.Interior.ColorIndex = xlNone
    ActiveChart.HasLegend = False

    ActiveSheet.Shapes(Trim(Replace(ActiveChart.Name, nome, ""))).Top =
r.Cells(1, 1).Top
    ActiveSheet.Shapes(Trim(Replace(ActiveChart.Name, nome, ""))).Left =
r.Cells(1, 11).Left
    ActiveSheet.Shapes(Trim(Replace(ActiveChart.Name, nome, ""))).Width =
350
    ActiveSheet.Shapes(Trim(Replace(ActiveChart.Name, nome, ""))).Height =
200

    ActiveChart.SeriesCollection(1).Border.ColorIndex = 1
    ActiveChart.SeriesCollection(2).Border.ColorIndex = 3
    ActiveChart.SeriesCollection(3).Border.ColorIndex = 5
    ActiveChart.SeriesCollection(4).Border.ColorIndex = 4
    With ActiveChart.SeriesCollection(1)
        .Border.Weight = xlThin
        .Border.LineStyle = xlNone
        .MarkerBackgroundColorIndex = xlAutomatic
        .MarkerForegroundColorIndex = xlAutomatic
        .MarkerStyle = xlAutomatic
        .Smooth = False
        .MarkerSize = 5
        .Shadow = False
    End With
    With ActiveChart.Axes(xlValue)
        .HasTitle = True
        .AxisTitle.Caption = "NA(m)"
    End With
End Sub
```

```

.Border.Weight = xlHairline
.Border.LineStyle = xlAutomatic
.MajorTickMark = xlInside
.MinorTickMark = xlInside
.TickLabelPosition = xlNextToAxis
.MinimumScale = 0
.MaximumScale = 0.5
.MinorUnit = 0.0005
.MajorUnit = 0.001
.Crosses = xlAutomatic
.ReversePlotOrder = False
.ScaleType = xlLinear
.DisplayUnit = xlNone
.TickLabels.NumberFormat = "0.0"
End With
End Sub

```

Função para cálculo da linha d'água em escoamento Sub Crítico

```

Function JusMon(Q As Double, B As Double, L As Double, Ycont As Double, _
                CFm As Double, CFj As Double, k As Double, _
                c1 As Double, c2 As Double, Nsec As Double, Tipo As String,
                Temp As Single) As Double

Dim i As Integer, j As Integer
Dim dx As Double
Dim CF0 As Double, CF1 As Double
Dim Ar0 As Double, Ar1 As Double
Dim Pr0 As Double, Pr1 As Double
Dim Rh0 As Double, Rh1 As Double
Dim Y0 As Double, Y1 As Double
Dim A0 As Double, a1 As Double
Dim Fr0 As Double, Fr1 As Double
Dim K0 As Double, K1 As Double
Dim Sf0 As Double, Sf1 As Double
Dim iter As Integer, niter As Integer
Dim Ytol As Double
Dim aihconst As Double
Dim Arm As Double, Frm As Double
Dim DD As Double, BB As Double, EE As Double
Dim Yprov As Double
Dim reitera As Boolean
Dim Rey0 As Double, Rey1 As Double
Dim S0 As Double
Dim Ni As Double

niter = 100
Ytol = 0.0001

Ni = fNi(Temp)
dx = L / (Nsec - 1)
S0 = (CFm - CFj) / L
If k <= 0 Then k = 0.0000001
i = Nsec

Y0 = Ycont
CF0 = CFj
A0 = B * (Y0 - CF0)
Pr0 = 2 * (Y0 - CF0) + B
Rh0 = A0 / Pr0
Rh0 = Y0 - CF0
Fr0 = Q ^ 2 * B / g / A0 ^ 3
Rey0 = (Q / A0 * 4 * Rh0 / Ni)

```



```

'K0 = fK2(tipo, k, A0, Rh0, Rey0, c1, c2)
Sf0 = Sf(Tipo, Q, k, A0, Rh0, Rey0, c1, c2)

For i = Nsec - 1 To 1 Step -1
  iter = 0
  CF1 = dx * S0 + CF0
  Y1 = Y0
  Do
    a1 = B * (Y1 - CF1)
    Pr1 = 2 * (Y1 - CF1) + B
    Rh1 = a1 / Pr1
    'Rh1 = Y1 - CF1
    Fr1 = Q ^ 2 * B / g / a1 ^ 3
    aihconst = B * (Y1 - CF0)
    Arm = (a1 + A0) / 2
    Frm = (Fr1 + Fr0) / 2
    Rey1 = (Q / a1 * 4 * Rh1 / Ni)
    'K1 = fK2(tipo, k, A1, Rh1, Rey1, c1, c2)
    Sf1 = Sf(Tipo, Q, k, a1, Rh1, Rey1, c1, c2)
    DD = g * Arm * (1 - Frm) / dx
    BB = -DD
    EE = (Q ^ 2) / (Arm ^ 2) * (aihconst - a1) / dx - g * Arm * (Sf1 +
Sf0) / 2
    Yprov = (EE - DD * Y0) / BB
    reitera = False
    If Abs(Yprov - Y1) > Ytol Then reitera = True
    Y1 = Yprov
    incr iter
  Loop Until iter > niter Or Not reitera
  CF0 = CF1
  A0 = a1
  Pr0 = Pr1
  Rh0 = Rh1
  Fr0 = Fr1
  K0 = K1
  Y0 = Y1
  Rey0 = Rey1
  Sf0 = Sf1
Next i
JusMon = Y1
End Function

```

Função para cálculo da linha d'água em escoamento super crítico

```

Function MonJus(Q As Double, B As Double, L As Double, Ycont As Double, _
    CFm As Double, CFj As Double, k As Double, _
    c1 As Double, c2 As Double, Nsec As Double, Tipo As String)
As Double

Dim i As Integer, j As Integer
Dim dx As Double
Dim CF0 As Double, CF1 As Double
Dim Ar0 As Double, Ar1 As Double
Dim Pr0 As Double, Pr1 As Double
Dim Rh0 As Double, Rh1 As Double
Dim Y0 As Double, Y1 As Double
Dim A0 As Double, a1 As Double
Dim Fr0 As Double, Fr1 As Double
Dim K0 As Double, K1 As Double
Dim Sf0 As Double, Sf1 As Double
Dim iter As Integer, niter As Integer
Dim Ytol As Double
Dim aihconst As Double
Dim Arm As Double, Frm As Double
Dim DD As Double, BB As Double, EE As Double

```

```

Dim Yprov As Double
Dim reitera As Boolean
Dim Rey0 As Double, Rey1 As Double
Dim S0 As Double

niter = 100
Ytol = 0.0001

dx = L / (Nsec - 1)
S0 = (CFm - CFj) / L
If k <= 0 Then k = 0.0000001
i = Nsec
'CF0 = (Nsec - i) * dx * S0
Y0 = Ycont
CF0 = CFm
A0 = B * (Y0 - CF0)
Pr0 = 2 * (Y0 - CF0) + B
Rh0 = A0 / Pr0
'Rh0 = Y0 - CF0
Fr0 = Q ^ 2 * B / g / A0 ^ 3
Rey0 = (Q / A0 * 4 * Rh0 / 0.00000101)
'K0 = fK2(tipo, k, A0, Rh0, Rey0, c1, c2)
Sf0 = Sf(Tipo, Q, k, A0, Rh0, Rey0, c1, c2)
For i = 2 To Nsec
  iter = 0
  CF1 = CF0 - dx * S0
  Y1 = Y0
  Do
    a1 = B * (Y1 - CF1)
    Pr1 = 2 * (Y1 - CF1) + B
    Rh1 = a1 / Pr1
    'Rh1 = Y1 - CF1
    Fr1 = Q ^ 2 * B / g / a1 ^ 3
    aihconst = B * (Y0 - CF1)
    Arm = (a1 + A0) / 2
    Frm = (Fr1 + Fr0) / 2
    Rey1 = (Q / a1 * 4 * Rh1 / 0.00000101)
    'K1 = fK2(tipo, k, A1, Rh1, Rey1, c1, c2)
    Sf1 = Sf(Tipo, Q, k, a1, Rh1, Rey1, c1, c2)
    DD = g * Arm * (1 - Frm) / dx
    BB = -DD
    EE = Q ^ 2 / Arm ^ 2 * (aihconst - A0) / dx - g * Arm * (Sf1 + Sf0)
  / 2
    Yprov = (EE - BB * Y0) / DD
    reitera = False
    If Abs(Yprov - Y1) > Ytol Then reitera = True
    Y1 = Yprov
    incr iter
  Loop Until iter > niter Or Not reitera
  CF0 = CF1
  A0 = a1
  Pr0 = Pr1
  Rh0 = Rh1
  Fr0 = Fr1
  K0 = K1
  Y0 = Y1
  Rey0 = Rey1
  Sf0 = Sf1
Next i

MonJus = Y1
End Function

```