



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



Centro de Ciências
e Tecnologia

DISSERTAÇÃO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

**RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO UNIFORME EM CANAIS
CIRCULARES LISOS**

MAURÍCIO COSTA GOLDFARB

Campina Grande - Paraíba
FEVEREIRO - 2002

**RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO UNIFORME
EM CANAIS CIRCULARES LISOS**

MAURÍCIO COSTA GOLDFARB

ENGENHEIRO CIVIL

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós - Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba–Campus II, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: IRRIGAÇÃO E DRENAGEM.

ORIENTADORES: Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva

Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO DE 2002



G618r Goldfarb, Mauricio Costa
Resistencia ao escoamento uniforme em canais circulares lisos / Mauricio Costa Goldfarb. - Campina Grande, 2002.
68 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Agricola) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

1. Hidraulica 2. Canais Abertos 3. Dissertacao I. Silva,
Tarciso Cabral da II. Azevedo, Carlos Alberto Vieira de
III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB)
IV. Título

CDU 626(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

MAURÍCIO COSTA GOLDFARB

Título: “Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais Circulares Lisos”.

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Tarciso Cabral da Silva

Aprovado

Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva – CT/UFPB - Orientador

Carlos Alberto Vieira de Azevedo

Aprovado

Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo – CCT/UFPB – Orientador

Lúcio Flávio Ferreira Moreira

Aprovado

Prof. Dr. Lúcio Flávio Ferreira Moreira – UFRN - Examinador

Vera Lúcia Antunes de Lima

APROVADO

Prof. Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima – CCT/UFPB - Examinadora

FEVEREIRO - 2002

Aos meus pais, Júlio Goldfarb e Maria Marly de
Castro Costa, a minha avó, Osanete de Castro
Costa (in memoriam), a minha esposa, Maria
Patrícia Lopes Goldfarb, e, a minha filha, Lívia
Lopes Goldfarb,

dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva, pela orientação e incentivo na elaboração desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo, que me aceitou como aluno, e acompanhou-me no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

Ao prof. Dr. Colin J. Apelt, da Universidade Queensland, que forneceu material imprescindível à elaboração desta dissertação.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, que tornou possível a realização desta pesquisa.

Ao chefe do departamento, Prof. Ms. Clovis Dias, em nome do Departamento de Tecnologia da Construção Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, pelo apoio acadêmico.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

A minha esposa Maria Patrícia Lopes Goldfarb, e demais pessoas que contribuíram na elaboração deste trabalho.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Dimensão
A	Área da seção transversal do canal.....	L^2
B	Largura do topo do canal.....	L
C	Coefficiente de Chezy	$L^{1/2}T^{-1}$
D	Diâmetro do tubo.....	L
e	Altura da rugosidade da superfície.....	L
f	Fator de atrito para tubos circulares.....	1
f*	Fator de atrito modificado	1
f _c	Fator de atrito para canais.....	1
F _t	Força devido ao atrito	MLT^{-2}
F _{sx}	Força de superfície na direção x	MLT^{-2}
F _{Bx}	Força de campo na direção x	MLT^{-2}
g	Aceleração da gravidade.....	LT^{-2}
Re	Número de Reynoldos	1
n	Coefficiente de resistência de Manning	$L^{-2/3}T$
P	Perímetro molhado da seção transversal do escoamento uniforme	L
R	Raio hidráulico da seção transversal do escoamento.....	L
ℳ	Função para aproximação da tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento	L
S	Declividade longitudinal da linha d'água do escoamento.....	1
y	Profundidade normal do escoamento.....	L
y _D	Profundidade do escoamento relativa ao diâmetro do tubo equivalente (A/D).....	L

y_{av}	Profundidade média do escoamento relativa à superfície livre (A/B)	L
X	Variável auxiliar independente	L
Y	Variável auxiliar independente	L
μ	Viscosidade dinâmica da água	$ML^{-1}T^{-1}$
ν	Viscosidade cinemática da água	L^2T^{-1}
ρ	Massa específica da água	ML^{-3}
δ	Densidade da água	1
γ	Peso específico da água	$ML^{-2}T^{-2}$
ρ	Massa específica da água	ML^{-3}
τ	Tensão de cisalhamento ou tangencial.....	$ML^{-1}T^{-2}$
τ_0	Tensão de cisalhamento ou média	$ML^{-1}T^{-2}$
ψ	Fator de forma do método de Kazemipour	1
ψ_t	Fator de forma do método de Silva	1
ψ_1	Componente do fator de forma do método de Kazemipour (P/D)	1
ψ_2	Componente do fator de forma do método de Kazemipour (função de D/y_D)	1
ψ_{2t}	Componente do fator de forma do método de Silva que possibilita a comparação com o método de Kazemipour.....	1

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Curvas de tensão de cisalhamento obtidas por Replogle e Chow para canais circulares.....	04
2	Perfis experimentais de Kirkgoz e Ardiçoglu e esquema dos pontos de medição para perfil retangular.....	05
3	Resultados experimentais de Kirkgoz e Ardiçoglu: (a) influência do efeito de forma na camada limite; (b) influência do efeito de forma na velocidade adimensionalizada.....	06
4	Número de Reynolds versus fator de atrito para equação 1 e os dados experimentais.....	09
5	Parâmetro ψ_2 versus D/y_D para os dados de Apelt e Kazemipour....	11
6	Seção transversal (esquerda) e longitudinal (direita) do volume de controle e coordenadas usadas para análise do escoamento uniforme	14
7	Isoveloses obtidas em laboratório para $y/D = 2/3$	21
8	Comparação entre dados laboratoriais e o modelo desenvolvido por Cokjat e Younis para os vetores de correntes secundárias.....	23
9	Comparação entre dados laboratoriais e o modelo desenvolvido por Cokjat e Younis para as linhas de velocidade do escoamento principal	24
10	Vista do experimento de Pimenta (1966) - Laboratório de hidráulica da USP.....	26
11	Vista do experimento de Kazemipour & Apelt - Laboratório de Hidráulica da Universidade de Queensland	27
12	Dados de Pimenta e equação de Von Karman – Prandtl	35
13	Dados de Apelt e equação de Von Karman – Prandtl.....	35
14	Dados utilizados por Adepoju e equação de von Karman – Prandtl...35	

15	Comportamento do parâmetro de forma ψ_t com o parâmetro geométrico y/D	40
16	Relação entre as variáveis X e Y	41
17	Dados de Kazemipour e Apelt e equação 5.35.....	42
18	Segundo parâmetro ψ_{2t} de Silva (1992), e ψ_2 de Kazemipour.....	42
19	Parâmetro ψ_t de Silva (1992), e ψ de Kazemipour.....	43
20	Fator de atrito experimental f_c e a equação de von Karmam – Prandtl.....	44
21	Fator de atrito f_t modificado e a equação para tubos pressurizados de von Karmam – Prandtl.....	45
22	Fator de atrito f^* modificado e a equação para tubos pressurizados de von Karmam – Prandtl.....	46

SUMÁRIO

Lista de Símbolos.....	v
Lista de Figuras.....	vii
Resumo.....	x
Abstract	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Efeito de Forma no Escoamento Uniforme Livre.....	3
2.2 O Modelo de Silva	13
2.3 Elementos do Efeito de Forma.....	18
2.3.1 Distribuição da Tensão de Cisalhamento.....	18
2.3.2 Correntes Secundárias.....	21
2.4 Obtenção dos Dados.....	25
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 Análise dos Dados.....	29
3.2 Análise Dimensional.....	29
3.3 Adaptação da Método de Silva aos Canais Circulares.....	31
3.4 Ajuste Polinomial do Método de Kazemipour	32
3.5 Comparação entre os Métodos.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1 Análise dos Dados.....	34
4.2 Adaptação da Método de Silva aos Canais Circulares.....	37
4.3 Ajuste Polinomial do Método de Kazemipour	40
4.4 Comparação entre os Métodos.....	42
4.5 Aplicação dos Modelos.....	44
4.5.1 Aplicação aos dados de Laboratório	44
4.5.2 Algoritmo para Aplicação em Projetos.....	46
4.5.3 Aplicações Práticas.....	48
5 CONCLUSÕES	52

6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	54
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
APÊNDICES	59

RESUMO

Um grande número de modelos hidráulicos podem ser aplicados para representar o escoamento turbulento uniforme em canais. A equação de Manning, uma das mais utilizadas por projetistas ocidentais, pode ocasionar um erro de até 30% em seus resultados, segundo o manual no 9 da WPCF (1972). Assim, como a equação de Manning, diversas outras metodologias não representam satisfatoriamente o efeito da forma da seção transversal do escoamento. Neste trabalho, foi feito um levantamento bibliográfico sobre a importância deste efeito, como também um estudo da aplicação de duas metodologias que buscam computar satisfatoriamente o efeito de forma. O modelo desenvolvido por Silva (1992), baseado nas equações básicas do escoamento uniforme e considerando uma distribuição não uniforme da tensão de cisalhamento no perímetro molhado, foi aplicado em canais de seção circular, e, apesar de fundamentado num procedimento puramente analítico, apresentou resultados de grande importância, visto que os parâmetros de forma utilizados por Silva (1992), apresentaram-se com comportamento semelhante aos utilizados por Kazemipour e Apelt (1980). A metodologia desenvolvida por Kazemipour e Apelt (1980), a partir de considerações da análise dimensional, foi ajustada de forma a tornar-se completamente equacionável sem a necessidade de recursos gráficos. O método de Kazemipour mostrou-se bastante eficiente para o cálculo de escoamento uniforme livre em canais lisos de geometria circular. Os parâmetros geométricos (P , D , y_D) utilizados por estes pesquisadores mostraram-se suficientes para representar a forma da geometria da seção transversal nos procedimentos de cálculo. Fez-se uma comparação entre estes modelos através da análise dos parâmetros de forma utilizados para representar a geometria da seção, onde se comprovou a semelhança dos parâmetros de forma utilizados nas duas metodologias. Finalmente foi apresentado um procedimento de cálculo utilizando o "método de Kazemipour" ajustado analiticamente.

ABSTRACT

A great number of hydraulic models can be applied to represent the uniform turbulent flow in channels. The equation of Manning, one of the more used by designers, can cause a 30% error in the results, according to the manual in the 9 of WPCF (1972). Like this, as the equation of Manning, several other methodologies don't represent the effect in the way of the traverse section of the flow satisfactorily. In this work, it was made a bibliographical survey on the importance of this effect, as well as a study of the application of two methodologies that search to compute the form effect satisfactorily. The model developed by Silva (1992), based on the basic equations of the uniform flow and considering a distribution non uniform of the tension of shear in the wet perimeter, it was applied in channels of circular section, and, in spite of having based purely in a procedure analytic, it presented results of great importance, because the form parameters used by Silva (1992), came with behavior similar to the used by Kazemipour and Apelt (1980). The methodology developed by Kazemipour and Apelt (1980), starting from considerations of the dimensional analysis, it was adjusted in way to become completely equacionável without the need of graphic resources. The method of Kazemipour was shown quite efficient for the calculation of free uniform flow in flat channels of circular geometry. The geometric parameters (P , D , yD) used by these researchers they were shown enough to represent the form of the geometry of the traverse section in the calculation procedures. A comparison between these these models through the analysis of the form parameters used to represent the geometry of the section proven the likeness of the form parameters used in the two methodologies. Finally is presented a calculation procedure using the "method of Kazemipour" adjusted analytically.

1 INTRODUÇÃO

O grande número de equações disponíveis para o cálculo do escoamento turbulento uniforme em canais demonstra não só o quanto já foi desenvolvido neste campo da hidráulica, mas também revela o grau de incerteza ainda existente. A equação de Manning, uma das mais utilizadas por projetistas ocidentais, pode ocasionar um erro de até 30% em seus resultados, segundo o manual nº 9 da WPCF (1972).

De acordo com Silva (1992), as diversas formulações matemáticas apresentadas para o cálculo do escoamento uniforme em canais, a exemplo da própria equação de Chezy-Manning, representam a geometria da seção transversal simplesmente pela área A e o raio hidráulico R . A suposição de que o raio hidráulico e a área da seção transversal sejam suficientes para representar a forma da seção transversal foi comprovada como não verdadeira nas conclusões de Shih e Grigg (1967). Estes pesquisadores ensaiaram dois canais de diferentes formas, mas com o mesmo valor de raio hidráulico, mesma área da seção transversal, e com iguais declividade e configuração do material das paredes, e comprovaram que estes apresentavam diferentes valores de velocidade média em escoamento uniforme. Entretanto, as fórmulas gerais existentes para o cálculo do fluxo uniforme turbulento computam indevidamente, neste caso, a mesma velocidade média para os dois canais. A essa consideração simplista está associada a baixa eficiência de diversas equações utilizadas para o cálculo da resistência ao escoamento uniforme em canais abertos.

Silva (1992), desenvolveu um modelo que já foi aplicado em seções retangulares, pelo próprio, em canais trapezoidais, por Figueiredo (1993), em seções triangulares, por Oliveira (1994). Esta metodologia, equacionada a partir das fórmulas básicas da mecânica dos fluidos, busca introduzir os efeitos da desuniformidade da tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento. Para tanto, o parâmetro de forma utilizado para representar a geometria da seção é calculado por uma razão entre a integral da tensão de cisalhamento no perímetro molhado e seu valor médio calculado globalmente. A grande vantagem deste modelo consiste na possibilidade de uma representação analítica do efeito de forma.

Kazemipour e Apelt (1980), desenvolveram uma metodologia, de bastante eficiência, denominada “método de Kazemipour”. Esta, utiliza na representação do efeito de forma uma combinação de dois parâmetros distintos. Um deles, obtido dos valores experimentais do escoamento, é fornecido apenas de forma gráfica. As características do comportamento da curva que descreve este parâmetro impede a sua representação através das equações corriqueiramente utilizadas na engenharia. A matematização do método de Kazemipour é feita neste trabalho através de um ajuste polinomial utilizando variáveis transformadas.

Neste trabalho é feito um estudo acerca dos efeitos de forma no escoamento turbulento uniforme em canais circulares lisos¹. Efeito como o rebaixamento do ponto de velocidade máxima com relação a superfície do escoamento, diferente do que é apresentado em diversos compêndios de hidráulica, será relacionado à geometria da seção transversal. E ainda, os modelos de Silva (1992) e Kazemipour e Apelt (1980) que buscam representar satisfatoriamente os efeitos de forma são trabalhados nesta dissertação. Através da análise dos parâmetros de forma utilizados, é feita uma comparação entre as duas metodologias. Finalmente, é apresentado um algoritmo para aplicações do método de Kazemipour ajustado analiticamente.

Os objetivos específicos deste trabalho foram os seguintes:

1. Avaliar os dados de escoamento uniforme livre de Pimenta (1966) e Kazemipour & Apelt (1980), disponíveis na literatura;
2. Adaptar a metodologia de Silva (1992) para o caso de escoamento uniforme em canais circulares;
3. Fazer o ajuste polinomial da metodologia de Kazemipour e Apelt (1980), tornando o método equacionável sem a necessidade de recursos gráficos;
4. Comparação das metodologias de Silva (1992) e Kazemipour e Apelt (1980).

¹ Nos canais lisos, as saliências da parede estão completamente submersas na sub-camada laminar ou viscosa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Efeito de Forma no escoamento Uniforme Livre

De acordo com Silva (1992), a primeira referência bibliográfica a respeito do efeito da forma da seção transversal no cálculo da resistência foi publicada por Bazin no ano de 1856. Esse pesquisador realizou uma série de experimentos buscando comprovar a relação da forma da seção com a perda de carga. Já no século XX, em 1923, L. Hopf apud Kazemipour e Apelt (1979), mostrou que a resistência ao escoamento em canais abertos é função da geometria da seção transversal, entre outros parâmetros.

Depois da introdução dos conceitos modernos da teoria da camada limite e dedução das fórmulas de resistência hidráulica para escoamento em tubos por von Karman e Prandtl, na década de 30, as pesquisas em escoamento em canais abertos têm sido orientadas no sentido de adotar essas novas formulações como base na obtenção de novas fórmulas.

Keulegan (1938) apud Oliveira (1994) utilizou a teoria de von Karman – Prandtl para o cálculo da resistência ao escoamento em canais abertos. Para tanto o autor propôs um parâmetro de ajuste adimensional associado a geometria da seção, denominado fator de forma.

Powell (1944), realizou uma série de experimentos de laboratório em canais com a superfície das paredes e do fundo da canal constituída de hastes de seção quadrada de aço uniformemente espaçadas, estendidas transversalmente ao longo do escoamento. Além de estabelecer algumas relações simples a partir das equações de Keulegan para canais lisos, propôs um termo corretivo a ser adicionado ao coeficiente C de Chezy devido a influência dos cantos e da superfície livre para canais retangulares.

Repogle e Chow (1966), realizaram experimentos utilizando tubo de Pitot para obtenção da velocidade em canais abertos de seções circulares. Estes pesquisadores utilizaram seus próprios dados para obter algumas constantes de uma simplificação semianalítica que reduz a fase inicial do problema à solução de equações do escoamento

tipo laminar. Posteriormente, essa solução simplificada foi modificada para calcular a distribuição da tensão de cisalhamento no escoamento uniforme livre. A figura 1 apresenta as curvas obtidas através desse procedimento que relacionam a razão entre a tensão de cisalhamento e seu valor médio com o perímetro molhado para três diferentes valores da altura do escoamento sobre o diâmetro interno da estrutura do canal.

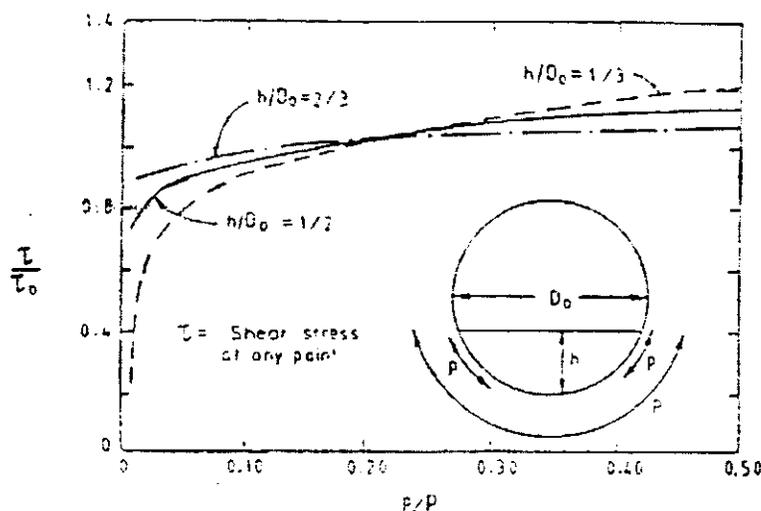


Figura 1 – Curvas de tensão de cisalhamento obtidas por Repogle e Chow (1966) para canais circulares.

Varwick apud Pimenta (1966) realizou em 1945, ensaios com rugosidade artificial em canais trapezoidais e triangulares, procurando comparar seus resultados com os dos condutos forçados obtidos por outros pesquisadores. Estes resultados foram analisados por Kirschmer, ainda segundo Pimenta (1966), em 1949 que concluiu sobre a existência dos regimes hidraulicamente liso, rugoso e intermediário, de maneira similar ao que ocorre nos condutos forçados e observa serem paralelas as curvas do coeficiente de atrito f em função do número de Reynolds e as curvas de von Karman – Prandtl no escoamento liso. As diferenças entre as curvas foram atribuídas à influência da rugosidade e da forma da seção transversal do canal. Outros pesquisadores na década de 50 e início dos anos 60 também confirmaram, através de resultados experimentais obtidos em diversas condições, a viabilidade de representação do coeficiente de perda de carga nos canais por fórmulas análogas às dos condutos forçados.

Trace e Lester apud Silva (1992) realizando experimentos em canais retangulares lisos, mostraram que o coeficiente de atrito é uma função do número de Reynolds, e, para o

mesmo número de Reynolds, é levemente maior do que para um tubo liso de diâmetro igual a quatro vezes o raio hidráulico ou um canal liso de largura infinita.

Nos anos 60, Pimenta (1966) realizou uma série de experimentos em canais de diversas formas, inclusive de seção circular, com paredes lisas e rugosas. Ele desenvolveu uma metodologia buscando relacionar a influência da forma no coeficiente C de Chezy. Os resultados experimentais não só confirmaram a relação do coeficiente de Chezy com o raio hidráulico, mas também com a declividade do canal e com a velocidade média do escoamento. Pimenta (op. cit.), conclui que outras investigações precisam ser realizadas com o propósito específico de correlacionar a velocidade média com o raio hidráulico.

Kirkgoz e Ardiçoglu (1997) utilizaram um anemômetro tipo laser-Doppler para determinar o perfil de velocidade em um escoamento turbulento uniforme subcrítico completamente desenvolvido num canal retangular. Através de seus resultados experimentais, construíram os perfis de velocidade para escoamento turbulento no canal retangular de diversas razões de aspecto (largura versus profundidade do escoamento), ao longo do comprimento do canal e para a seção localizada a 6,5 metros da sua entrada. Um exemplo dos perfis obtidos é apresentado na figura 2.

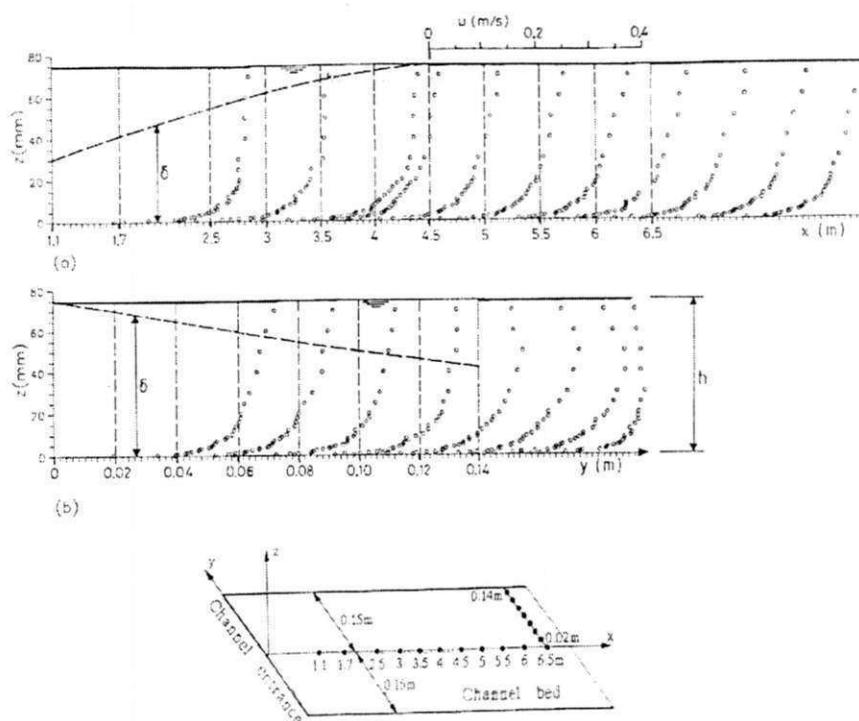


Figura 2 – Perfis experimentais de Kirkgoz e Ardiçoglu (1997) e esquema dos pontos de medição para perfil retangular com razão de aspecto igual a 4,0: (a) ao longo do canal; (b) na seção de 6,5 metros.

Entre outros resultados, Kirkgoz e Ardiçoglu (1997), observaram a influência do parâmetro de forma do canal, representado por esses pesquisadores pela razão de aspecto, na formação do perfil de velocidade e da camada limite do escoamento para canais abertos. Essa influência está representada na figura 3. Outra consideração importante observada por esses pesquisadores é o fato do perfil de velocidade atingir a sua amplitude máxima na superfície do escoamento apenas no caso de seções transversais com razão de aspecto maiores que 3,0 (caso da figura 2). Esse fato será posteriormente discutido no capítulo Efeitos de Forma, deste trabalho.

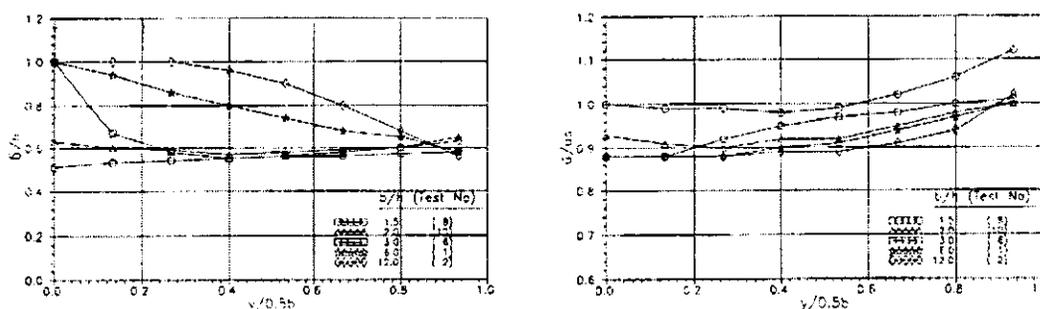


Figura 3 – Resultados experimentais de Kirkgoz e Ardiçoglu (1997): (a) influência do efeito de forma na camada limite; (b) influência do efeito de forma na velocidade adimensionalizada.

Engelund apud Silva (1992) investigou a resistência ao escoamento relacionada ao efeito da desuniformidade da distribuição da tensão de cisalhamento e a validade da adoção do raio hidráulico em análises de canais abertos. Propôs uma função para a relação da velocidade média e a velocidade de atrito a partir das equações de von Karman-Prandtl. Propôs também a introdução de um parâmetro denominado “raio de resistência”, substitutivo do raio hidráulico, derivado de uma metodologia na qual integra ao longo da largura do canal a distribuição vertical da velocidade. Para o caso de uma seção qualquer apresenta uma fórmula aproximada para o cálculo do raio de resistência.

Trabalhando com seções circulares, Rouse (1965) concluiu que as mudanças na profundidade do escoamento afetam a resistência de duas maneiras distintas: produzindo variações no valor do perímetro molhado por unidade de área da seção transversal e produzindo variações na distribuição de velocidades e na tensão de cisalhamento. Apoiou à validade do conceito de raio hidráulico, mas afirmou que o efeito da forma da seção

transversal está relacionada à variação no raio hidráulico. Referiu-se também à importância da razão de aspecto na análise relacionada com o efeito de forma da seção transversal.

Shih e Grigg (1967) fizeram um estudo sobre a validade do raio hidráulico como quantidade geométrica, concluindo que o efeito de forma não é totalmente refletido por este e que o seu uso poderia ser viável se agregado ao uso da razão de aspecto, principalmente para $B/y_n < 2$. Eles definiram um parâmetro adimensional denominado “número de Reynolds modificado” e constataram que a relação entre este parâmetro e o fator de atrito observado no canal é melhor e mais útil do que a relação entre o número de Reynolds e o coeficiente de atrito observado.

Marchi *apud* Silva (1992) estudou a influência da forma da seção transversal na resistência em canais de leito fixo e concluiu que o fator de forma é um multiplicador do raio hidráulico sendo esta nova grandeza denominada “raio de forma”. Os resultados de Marchi são baseados na consideração de que o coeficiente de forma independe do regime de turbulência do escoamento e é o mesmo para canais lisos ou rugosos de mesma forma de seção transversal.

A despeito da maioria dos pesquisadores, Jayaraman (1970) em suas investigações teóricas e experimentais introduziu dois novos parâmetros adimensionais para representação do efeito de forma. Os parâmetros adimensionais justificados em sua análise foram B/P e y_n/P , e utilizou-os na correção com outros parâmetros no desenvolvimento de um método gráfico para obtenção da velocidade média em canais lisos sem necessidade de conhecimento do fator de atrito n de Manning ou do fator de atrito observado f_c .

Tsuzuki *apud* Silva (1992) realizou pesquisa em escoamento uniforme turbulento livre com tubos cerâmicos. Ele apresentou um novo coeficiente C de Chezy, sendo este função de dois parâmetros. O primeiro parâmetro refletia a desuniformidade da tensão de cisalhamento e o segundo o efeito da forma da seção transversal. O professor Tsuzuki constatou ainda que a profundidade relativa y_n/D está relacionada com a rugosidade relativa e sugeriu um critério para obtenção de ábacos universais do tipo do diagrama de Moody para ser aplicado no cálculo do escoamento em canais.

Nalluri e Adepoju (1985), realizaram pesquisa utilizando os dados de May, de Kazemipour & Apelt (1980), e os dados gerados por eles próprios para escoamento livre em canais circulares. Apresentaram o problema da representação do efeito de forma devido à mudança na função que relaciona esse parâmetro que ocorre quando o nível do escoamento ultrapassa a metade do diâmetro. Constataram que o coeficiente de atrito em

canais é maior que para um tubo fechado de diâmetro equivalente igual a quatro vezes o raio hidráulico. Nos seus estudos observaram que a utilização do parâmetro adimensional y_n/P , juntamente com o raio hidráulico R representa melhor o efeito de forma do que a utilização de apenas este último parâmetro.

Houjou et al, apud Oliveira (1994), propuseram um método para cálculo do campo de velocidades em canais no qual a distribuição da tensão de cisalhamento nas paredes é um importante fator interveniente. No modelo desenvolvido por eles a equação da quantidade de movimento na forma diferencial é resolvida numericamente considerando-se um termo adicional de viscosidade devido a turbulência ao longo de um sistema de raios perpendiculares às linhas de igual velocidade do escoamento. Concluíram entre outras coisas que a estrutura do escoamento (distribuição de velocidade e tensões) depende somente da razão de aspecto e da rugosidade das paredes e do fundo canal, no caso de escoamento turbulento uniforme. Quando compararam seus resultados com valores laboratoriais de escoamento em canais retangulares, atribuíram às diferenças observadas com relação à distribuição da tensão de cisalhamento teórica, ao efeito causado pela presença de correntes secundárias no escoamento.

Myers apud Oliveira (1994) realizou alguns experimentos em canais de seções retangulares e compostas, e, ignorando todos os estudos anteriores sobre efeitos de forma, concluiu sobre a importância da influência da forma da seção transversal na vazão devido a ocorrência de correntes secundárias. Sendo assim, ele relacionou a presença de correntes secundárias a forma da seção. Advertiu também sobre a necessidade de se empreender uma investigação sistemática sobre o assunto.

Trabalhando com canais circulares e retangulares, Kazemipour e Apelt (1979) revisaram e analisaram os principais métodos de cálculo da resistência hidráulica ao escoamento uniforme que consideravam em suas formulações o efeito da forma da seção, e concluíram que os mesmos eram insatisfatórios, considerando o escoamento em canais como se fosse de um tubo equivalente de comprimento igual a quatro vezes o raio hidráulico. Concluíram também que o uso do raio hidráulico poderia ser adequado se acoplado a outros parâmetros relevantes que computassem o efeito de forma da seção transversal do canal. Constatando serem os métodos analisados incompletos ou falhos, empreenderam então uma investigação teórica apoiada nos dados experimentais de outros autores e nos resultados obtidos experimentalmente por eles mesmos. O modelo desenvolvido denominado “método de Kazemipour”, utiliza a equação para tubos

canais é maior que para um tubo fechado de diâmetro equivalente igual a quatro vezes o raio hidráulico. Nos seus estudos observaram que a utilização do parâmetro adimensional y_n/P , juntamente com o raio hidráulico R representa melhor o efeito de forma do que a utilização de apenas este último parâmetro.

Houjou et al, apud Oliveira (1994), propuseram um método para cálculo do campo de velocidades em canais no qual a distribuição da tensão de cisalhamento nas paredes é um importante fator interveniente. No modelo desenvolvido por eles a equação da quantidade de movimento na forma diferencial é resolvida numericamente considerando-se um termo adicional de viscosidade devido a turbulência ao longo de um sistema de raios perpendiculares às linhas de igual velocidade do escoamento. Concluíram entre outras coisas que a estrutura do escoamento (distribuição de velocidade e tensões) depende somente da razão de aspecto e da rugosidade das paredes e do fundo canal, no caso de escoamento turbulento uniforme. Quando compararam seus resultados com valores laboratoriais de escoamento em canais retangulares, atribuíram às diferenças observadas com relação à distribuição da tensão de cisalhamento teórica, ao efeito causado pela presença de correntes secundárias no escoamento.

Myers apud Oliveira (1994) realizou alguns experimentos em canais de seções retangulares e compostas, e, ignorando todos os estudos anteriores sobre efeitos de forma, concluiu sobre a importância da influência da forma da seção transversal na vazão devido a ocorrência de correntes secundárias. Sendo assim, ele relacionou a presença de correntes secundárias a forma da seção. Advertiu também sobre a necessidade de se empreender uma investigação sistemática sobre o assunto.

Trabalhando com canais circulares e retangulares, Kazemipour e Apelt (1979) revisaram e analisaram os principais métodos de cálculo da resistência hidráulica ao escoamento uniforme que consideravam em suas formulações o efeito da forma da seção, e concluíram que os mesmos eram insatisfatórios, considerando o escoamento em canais como se fosse de um tubo equivalente de comprimento igual a quatro vezes o raio hidráulico. Concluíram também que o uso do raio hidráulico poderia ser adequado se acoplado a outros parâmetros relevantes que computassem o efeito de forma da seção transversal do canal. Constatando serem os métodos analisados incompletos ou falhos, empreenderam então uma investigação teórica apoiada nos dados experimentais de outros autores e nos resultados obtidos experimentalmente por eles mesmos. O modelo desenvolvido denominado "método de Kazemipour", utiliza a equação para tubos

pressurizados de von Karmam – Prandtl (Equação 2.1), considera dois parâmetros adimensionais para representar o feito de forma, e permite o cálculo do fator de atrito para canais em escoamento turbulento uniforme, bem como a velocidade média a partir da fórmula universal de perdas de carga e diagramas tradicionais para fluxo em tubulações circulares sob pressão.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \text{Re}\sqrt{f} - 0,8 \quad (2.1)$$

O procedimento desenvolvido por Kazemipour e Apelt (1980) desloca os pontos experimentais de escoamento em canais na direção da linha que descreve a equação 2.1 de von Karman-Prandtl para tubos pressurizados. A figura 4 apresenta a tendência de paralelismo entre a curva que representa os fatores de atrito para canais abertos obtidos experimentalmente por esses autores e a curva da equação 2.1, para os regimes de escoamento subcrítico e supercrítico.

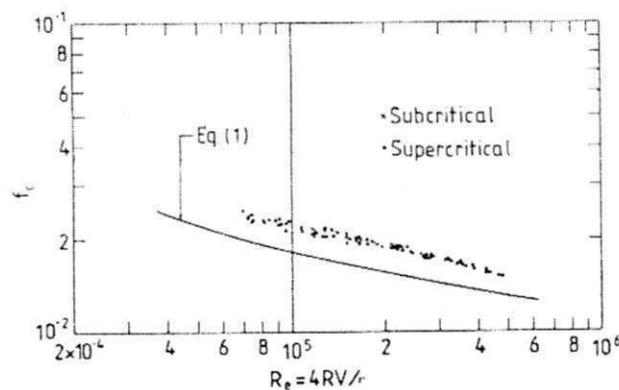


Figura 4 – Número de Reynolds versus fator de atrito para equação 1 e os dados experimentais (Kazemipour e Apelt, 1980).

Esse procedimento leva em conta os efeitos de forma da seção transversal através de dois parâmetros adimensionais, $\psi_1 = (P/D)^{1/2}$ e ψ_2 uma função do diâmetro e da altura y_D ($\psi_2 = F(D/y_D)$), que representam a forma da geometria característica da seção transversal. Os dois pesquisadores interpretaram os parâmetros adimensionais da seguinte maneira:

ψ_1 – variável que reflete os efeitos da desuniformidade da tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento, como um afastamento em relação à seção transversal de um canal retangular infinitamente largo.

ψ_2 – razão de aspecto que reflete os efeitos da desuniformidade da tensão de cisalhamento ao longo do perímetro molhado.

O procedimento de Kazemipour e Apelt (1980) teve como primeiro passo a introdução do parâmetro ψ_1 , maior do que a unidade e aproximando-se desse valor no caso de uma seção transversal infinitamente larga. Esse parâmetro foi utilizado para reduzir o valor de f_c de acordo com a seguinte relação:

$$f_1 = f_c / \psi_1 \quad (2.2)$$

O segundo parâmetro ψ_2 foi escolhido de forma que a combinação desses dois parâmetros ajustasse os valores do fator de atrito para canais abertos f_c , tornando-os iguais aos valores dos fatores de atrito para tubulações pressurizadas f , para um mesmo número de Reynolds. Com essa finalidade, os valores ψ_2 foram obtidos por esses autores da seguinte maneira:

- (i) Para cada ensaio, o fator de atrito f para tubos foi calculado com o mesmo número de Reynolds através da equação (2.1).
- (ii) Os valores de f_1 foram calculados através dos valores observados f_c e da equação (2.2).
- (iii) Os valores de ψ_2 foram então obtidos da relação:

$$\psi_2 = f / f_1 \quad (2.3)$$

- (iv) Finalmente, os valores de ψ_2 então obtidos foram plotados versus o D/y_D correspondente.

De acordo com Silva (1992), o resultado deste procedimento é similar à metodologia que Pillai desenvolveu em 1970, diferindo apenas com relação ao parâmetro de forma (Pillai utilizou apenas o parâmetro representado pela razão entre o perímetro

molhado e o raio hidráulico). A curva da figura 5, obtida através desse procedimento foi tomada como o melhor ajustamento entre ψ_2 e D/y_D .

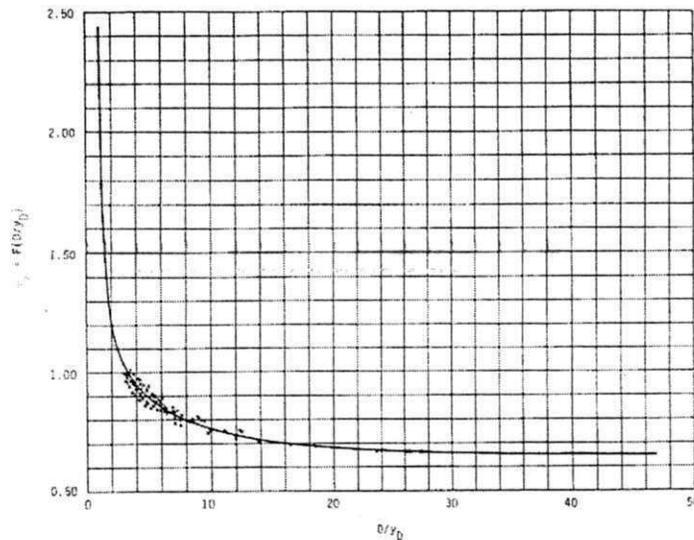


Figura 5 –Parâmetro ψ_2 versus D/y_D para os dados de Kazemipour & Apelt (1980).

Uma vez obtidos os dois parâmetros de forma, a relação entre essas grandezas pode fornecer um único parâmetro ψ que representa a geometria da seção transversal do escoamento.

$$\psi = \psi_1 / \psi_2 \quad (2.4)$$

A relação entre o fator de atrito para canais f_c e o parâmetro ψ , fornece o fator de atrito modificado f_* através da seguinte relação:

$$f_* = f_c / \psi \quad (2.5)$$

Os valores do fator de atrito modificado f_* , obtidos desse procedimento, satisfazem bem a equação 2.1 para o fator de atrito em tubos, isto é, f_* tem o mesmo valor que f para um mesmo número de Reynolds.

Os resultados obtidos por Kazemipour e Apelt (1980) permitiram-lhes as seguintes conclusões:

- (a) A viabilidade do método foi claramente demonstrada para o caso de canais lisos retangulares e circulares;
- (b) O emprego dos dados disponíveis indica que o mesmo se aplica bem aos escoamentos na região de transição e na zona rugosa de completa turbulência em canais retangulares e circulares lisos;
- (c) Os dados disponíveis utilizados indicam que o método aplica-se ao escoamento em canais trapezoidais lisos e ao escoamento em canais triangulares lisos, em estado subcrítico;
- (d) Os dados disponíveis avaliados indicam que o fator de forma para uma geometria específica de seção transversal é o mesmo para todos os regimes de escoamento uniforme turbulento, isto é, liso, transição e rugoso, em canais abertos.

O método de Kazemipour tem sido considerado por diversos autores a exemplo de Nalluri & Adepoju (1985), Silva (1992) e Oliveira (1994), como um método racional que pode ser aplicado com sucesso a uma série de casos. A aplicação desse método no caso de canais nos quais as dimensões da seção transversal são conhecidas, faz-se da seguinte maneira:

- (i) O fator ψ_1 é calculado por $\psi_1 = (P/D)^{1/2}$.
- (ii) Calcula-se a razão de aspecto D/y_D e com esse valor ψ_2 é obtido através da curva da figura 5.
- (iii) O fator de forma ψ é calculado da equação 2.4.
- (iv) Se o fluxo é de regime liso ou de transição, calcula-se $Re\sqrt{f^*}$ através da equação seguinte obtida da fórmula de Darcy para cálculo de perdas de carga em tubulações pressurizadas.

$$Re(f^*)^{1/2} = [(128 R^3 g S) / (v^2 \psi)]^{1/2} \quad (2.6)$$

- (v) O valor correspondente de f^* é obtido da equação (2.1) ou da equação de Colebrook-White com coeficiente de atrito modificado, ou de diagramas para cálculo de resistência em tubos.
- (vi) Finalmente, o fator de atrito é obtido então por $f_c = \psi f^*$.

Estudando os efeitos de forma na resistência ao escoamento uniforme livre em canais, Silva (1992) desenvolveu um modelo matemático baseado nas equações básicas do escoamento uniforme e considerando uma distribuição adequada, não uniforme, da tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento. O resultado obtido foi comparado com o método de Kazemipour através da comparação das curvas dos parâmetros correspondentes do efeito de forma. Esse pesquisador fez uma aplicação do modelo desenvolvido para o caso de canais com seções retangulares. Posteriormente, Silva (1995) desenvolveu uma simplificação do método de Kazemipour que consiste na aproximação polinomial da curva que descreve o segundo parâmetro adimensional, e permite representar os efeitos de forma do escoamento de maneira mais rápida e concisa, podendo ser empregada no dimensionamento de canais retangulares lisos, em substituição às formulas empíricas tradicionalmente utilizadas.

Oliveira (1994), adaptou o modelo de Silva (1992), aplicando-o em canais lisos de seções triangulares. Através de um estudo quantitativo Oliveira (1994) concluiu que a contribuição da resistência ao escoamento devido a interface água-ar é menor que 0,04% do total, para o caso dos canais estudados. Deste resultado pode-se esperar uma contribuição desprezível desta parcela nas propriedades do escoamento turbulento uniforme. Oliveira (1994) fez também um estudo comparativo do fator de atrito f do canal triangular estudado com o fator de atrito de um canal circular de mesma área, e atribuiu às diferenças encontradas aos efeitos de forma do escoamento.

2.2 O Modelo de Silva (1992)

O teorema de Transporte de Reynolds, desenvolvido das equações básicas na forma integral para um volume de controle, é apresentado na literatura de mecânica dos fluidos através da seguinte equação:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \eta \rho dV + \int_{SC} \eta \rho v dA \quad (2.7)$$

onde N é uma propriedade extensiva do sistema, η representa esta mesma propriedade por unidade de massa, V o volume de controle, v o vetor velocidade, e A sendo a área da seção transversal de entrada do volume de controle. Os índices VC e SC referem-se respectivamente a volume de controle e superfície de controle.

A equação 2.7 pode ser interpretada como a taxa de variação de uma propriedade N , de um sistema, e as variações dessa propriedade associadas com um volume de controle. Fazendo $N = M$, sendo M a massa do sistema, decorre $\eta = 1$.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \eta \rho v dA \quad (2.8)$$

De acordo com o princípio da conservação da massa, esta é constante para um determinado sistema, logo, a taxa de variação dessa propriedade no tempo será igual a zero. Para escoamento permanente, a taxa de variação de uma determinada grandeza no tempo também é igual a zero. Dessas duas considerações decorre que o termo da esquerda e o primeiro termo da direita da equação 2.8 são nulos. Assim a equação anterior torna-se:

$$\int_{SC} \eta \rho v dA = 0 \quad (2.9)$$

A resistência ao escoamento uniforme pode ser analisada aplicando-se a equação 2.9 ao volume de controle proposto por Silva (1992), apresentado na figura 6.

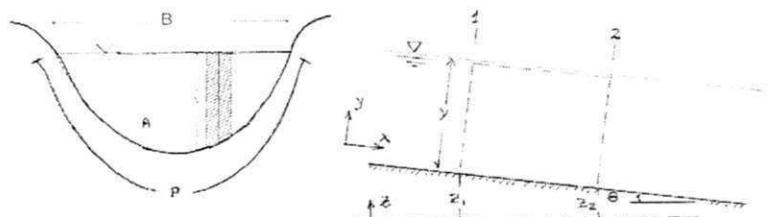


Figura 6 – Seção transversal (esquerda) e longitudinal (direita) do volume de controle e coordenadas usadas para análise do escoamento uniforme.

A aplicação da equação 2.9 no volume de controle apresentado na figura 6, fornece a equação 2.10.

$$0 = -\rho v_1 A_1 + \rho v_2 A_2 \quad (2.10)$$

onde v_1 e v_2 representam a velocidade na entrada e saída do volume de controle.

Sabendo que a massa específica é constante e que a área de entrada do volume de controle é igual a de saída, tem-se:

$$v_1 = v_2 \quad (2.11)$$

Fazendo agora $N = Mu$, quantidade de movimento, na equação 2.7, e, observando que o primeiro termo do lado direito é nulo devido ao escoamento permanente, tem-se:

$$\frac{dMu}{dt} = \int_{SC} u \rho v dA \quad (2.12)$$

onde u é o vetor velocidade. O termo do lado esquerdo da equação anterior pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\frac{dMu}{dt} = \frac{Mdu}{dt} = M \cdot a = F \quad (2.13)$$

onde u representa a componente da velocidade na direção x e a a aceleração do escoamento.

Assim, a equação 2.12 toma a forma da equação da quantidade de movimento para o volume de controle. Representando a força atuante como a soma das forças de superfície F_{SX} e das forças de campo F_{BX} , tem-se:

$$F_{SX} + F_{BX} = \int_{SC} u \rho v dA \quad (2.14)$$

Como o escoamento se faz com profundidade constante e velocidade uniforme, o saldo da quantidade de movimento do fluxo através da superfície de controle é nula. A resultante das forças de pressão também será nula, considerando a distribuição hidrostática das pressões. A componente na direção x da força devido à gravidade será portanto a força do peso da água do volume de controle na direção x . Considerando ainda pequenos valores de declividade, $\theta \cong \text{sen}\theta \cong \text{tg}\theta = S$, a equação 2.14 resulta em

$$-F_t + W \text{sen}\theta = 0$$

ou

$$F_t = W \text{sen}\theta \quad (2.15)$$

A força devido ao atrito F_t pode ser expressa pelo produto da tensão tangencial média τ_0 pela área do canal em que esta tensão atua. A equação 2.15 mostra que para escoamento uniforme a componente da força da gravidade que produz o movimento é equilibrada pela força de atrito atuando nas paredes do canal. A equação 2.15 pode então ser rescrita na forma seguinte.

$$\tau_0 P L = \gamma A L S$$

ou

$$\tau_0 = \rho g R S \quad (2.16)$$

Em termos de força tangencial na direção x , atuando no elemento de área $dA = dx dl$, tem-se:

$$\frac{dF}{dA} = \frac{dF}{dx dl} = \tau$$

ou

$$dF = \tau dx dl \quad (2.17)$$

Integrando-se a equação 2.17 ao longo do perímetro molhado, tem-se:

$$F = \int_P \tau dx dl \quad (2.18)$$

Para uma seção definida, a equação 2.18 toma a seguinte forma:

$$F = \Delta x \int_P \tau dl \quad (2.19)$$

Introduzindo-se agora um fator dito de forma ψ_t , que relacione a força tangencial calculada **através da equação 2.19 que contempla as** variações da tensão de cisalhamento ao longo do perímetro molhado do escoamento e a força tangencial calculada globalmente através de:

$$F_o = \rho g R S \Delta x P \quad (2.20)$$

tem-se:

$$\psi_t = \frac{\Delta x \int_P \tau dl}{\rho g R S \Delta x P} \quad (2.21)$$

Assim como na equação 2.16, a tensão de cisalhamento é calculada considerando agora a desuniformidade da distribuição desta no perímetro molhado através da substituição do raio hidráulico R por $\mathfrak{R} = f(B, y)$.

$$\tau_o = \rho g \mathfrak{R} S \quad (2.22)$$

onde a função r é calculada por $\mathfrak{R} = \tau / \rho g S$.

Das equações 2.21 e 2.22, tem-se:

$$\psi_t = \frac{\rho g S \Delta x \int_{\varphi} \mathfrak{R} dl}{\rho g \mathfrak{R} S \Delta x P} = \frac{I}{\mathfrak{R} P} \int_{\varphi} \mathfrak{R} dl \quad (2.23)$$

mas, $\psi_t = F / F_o$, então:

$$F = \rho g R S \Delta x P \psi_t \quad (2.24)$$

e ainda:

$$\tau_o = \rho g R S \psi_t \quad (2.25)$$

A expressão 2.25, proposta por Silva (1992), fornece a tensão de cisalhamento média calculada considerando-se as variações de τ ao longo do perímetro molhado P.

2.3 Elementos do Efeito de Forma

Os efeitos da forma da seção transversal de escoamento estão relacionados à presença de dois fenômenos distintos e associados: a distribuição não uniforme da tensão de cisalhamento no perímetro molhado, e, a existência de correntes secundárias no escoamento.

2.3.1 Distribuição da Tensão de Cisalhamento.

A distribuição da tensão de cisalhamento no perímetro molhado de um canal foge da condição uniforme devido ao efeito da turbulência e a presença de correntes secundárias. De acordo com Silva (1992), as fórmulas clássicas da hidráulica, na verdade, pouco contribuem, pois, de uma maneira geral, elas foram desenvolvidas considerando-se uma distribuição uniforme da tensão de cisalhamento no perímetro molhado, como acontece no escoamento de tubos circulares sob pressão. No entanto, os valores da tensão

de cisalhamento podem ser significativamente diferentes da tensão média na fronteira do escoamento.

Tominaga et al, ainda apud Silva (1992), realizaram experimentos para obter dados em canais retangulares e trapezoidais. Esses pesquisadores constataram que a tensão de cisalhamento aumenta em regiões da fronteira do escoamento para onde as correntes de circulação secundárias fluem, e, diminui nas regiões onde as correntes de circulação fogem da fronteira do escoamento.

Replogle e Chow (1966) desenvolveram pesquisa teórica fundamentada em seus próprios dados de laboratório a respeito da desuniformidade da tensão de cisalhamento no perímetro molhado dos canais circulares. Estes pesquisadores atribuem a complexidade do estudo a superposição de dois efeitos distintos, a turbulência, e à influência da presença de correntes secundárias no escoamento principal.

Os dados utilizados na pesquisa de Replogle e Chow (1966) foram obtidos em canais de cobre e aço, de forma a se relacionar também a rugosidade das paredes no efeito em questão. Os canais foram ensaiados em três alturas hidráulicas (y/D), $1/3$, $1/2$ e $2/3$, com relação à seção completamente cheia. A geometria do canal ensaiado facilitou bastante a obtenção dos perfis de velocidade pois os tubos de Pitot, utilizados para medir a velocidade foram instalados em um ponto fixo da parede do canal, e, a simples rotação do canal em torno do seu próprio eixo deslocava a medição para outro local relativo do perímetro molhado, onde nova medição era feita.

Para possibilitar a solução do problema, diversas considerações foram assumidas, de maneira a se buscar uma simplificação. Inicialmente, o escoamento foi admitido como uniforme laminar, assim, numa determinada seção as equações de Navier-Stokes podem ser reduzidas a equação de Poisson e uma solução encontrada. Obtidos dessa forma, os resultados foram posteriormente modificados de tal maneira que os perfis de velocidade calculados para uma determinada seção transversal se ajustassem aos valores obtidos experimentalmente.

Os efeitos da tensão de cisalhamento na velocidade do escoamento principal (no eixo x , para um sistema de referência x, y, z) foram relacionados através de duas componentes distintas, que variavam em função das coordenadas y e z . A primeira componente relacionava os efeitos das correntes secundárias, a segunda a viscosidade. Assim, a relação foi estabelecida:

$$u_x = k_s u_s(y,z) + k_v u_v(y,z) \quad (2.26)$$

onde u_x representa a velocidade do escoamento principal, k_s e k_v os coeficientes experimentais relacionados às correntes secundárias e à viscosidade, e u_s e u_v às componentes da velocidade principal devido aos dois efeitos distintos.

Para a determinação da tensão de cisalhamento os valores de velocidade foram aplicados **na equação de Ross modificada por Robertson** (apud Replogle e Chow, 1966). Esta equação relaciona a tensão de cisalhamento com a velocidade utilizando um coeficiente determinado como de arrasto:

$$\frac{u}{u_m} = 5,6 \sqrt{C_f / 2} \left(1 + \log \frac{S u_m}{\nu} + \log C_f / 2 \right) \quad (2.27)$$

onde u_m é a velocidade máxima na seção considerada, S é a distância da parede do canal ao ponto de medição, e, C_f o coeficiente de arrasto calculado por:

$$C_f = 2 \frac{\tau_o}{\rho u_m^2} \quad (2.28)$$

As equações anteriores foram resolvidas com a ajuda de um computador através do método da diferença finita. O programa utilizado gerava as curvas de cisalhamento com as equações 2.27 e 2.28. Dessa forma, as constantes da equação 2.26 eram determinadas, e, com esta equação se podia avaliar a influência das correntes secundárias na formação do perfil de cisalhamento. A figura 7 apresenta as isoveloses obtidas experimentalmente.

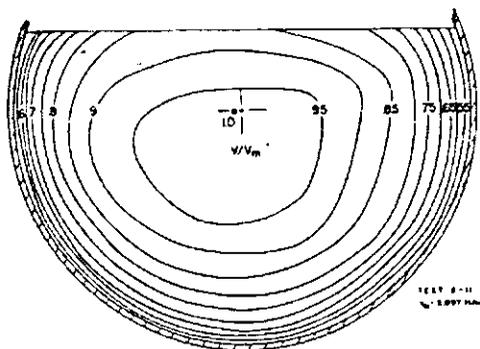


Figura 7 – Isoveloses obtidas em laboratório para $y/D = 2/3$. (Replogle e Chow,1966)

As principais conclusões de Replogle e Chow (1966) dizem respeito à confirmação da relação entre a geometria da seção e a influência das correntes secundárias, à distribuição do perfil de cisalhamento, e à localização do ponto de velocidade máxima. Com aumento da lâmina escoada para um determinado canal, observou-se o rebaixamento relativo do ponto de velocidade máxima com relação à superfície livre do fluido. Os efeitos das correntes secundárias no escoamento principal foram observados para valores de y/B maiores que 0,3. Para valores menores que 0,3 o efeito das correntes secundárias podem ser negligenciados e o escoamento considerado como uniforme. Em todos os testes feitos, menores valores da tensão de cisalhamento estavam próximos à superfície do escoamento, enquanto que o maior valor era medido no ponto de maior profundidade hidráulica, podendo se distanciar deste de um valor igual a aproximadamente 10% do perímetro molhado. Outra importante contribuição da pesquisa foi a constatação da independência da distribuição do perfil de cisalhamento com relação ao número de Froude, como também com o de Reynolds.

2.3.2 Correntes Secundárias

As correntes secundárias caracterizam-se por possuírem direção perpendicular ao sentido do escoamento principal. Essas correntes são também denominadas pela literatura como “correntes de canto”, pois geralmente são dirigidas do núcleo do escoamento principal às arestas ou fronteiras do escoamento.

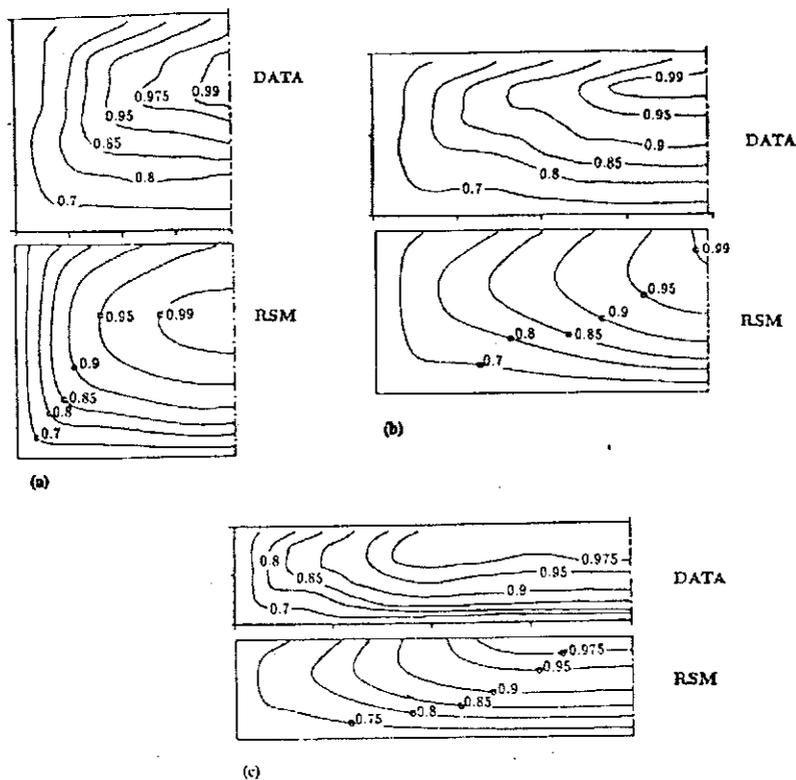


Figura 9 – Comparação entre dados laboratoriais e o modelo desenvolvido para as linhas de velocidade do escoamento principal. Razão de aspecto: (a) 2,01; (b) 3,94; (c) 8,0 (Cokjat e Younis, 1995).

O efeito de forma, representado pela razão de aspecto B/h nas características das correntes secundárias no escoamento livre foram detalhadamente estudado por Nezu e Rodi apud Silva (1992). Esses autores concluíram que o efeito do rebaixamento da velocidade máxima com relação à superfície do escoamento ocorre na faixa de $B/h < 5$. Posteriormente Kirkgoz e Ardiçoglu (1997), observaram que na verdade, esse efeito ocorre para valores de razão de aspecto menores que 3,0.

No caso de escoamentos uniformes livres em seções circulares, este autor desconhece trabalho experimental que forneça dados que possibilite a representação das correntes secundárias. No entanto, a importância do efeito de forma no escoamento principal já foi devidamente comprovada por diversos autores anteriormente citados neste trabalho. Observa-se que as correntes secundárias é também meio pelo qual a forma da seção interfere no escoamento principal. Outro fato importante que indica a presença de correntes secundárias é o rebaixamento do ponto de velocidade máxima, com relação à

superfície do escoamento, que também ocorre nas seções circulares, conforme apresentado por Replogle e Chow (1966).

2.4 Obtenção dos Dados

A impossibilidade de solução analítica pura para os problemas que envolvem o cálculo do escoamento turbulento em canais tornam indispensáveis os resultados advindos de laboratório. **Antoine Chézy**, um dos primeiros estudiosos do assunto, foi também pioneiro na obtenção de dados experimentais em 1772. Já em 1841, Dubuat apud Pimenta (1966) realizou cerca de 30 experimentos buscando equacionar o problema de escoamento em canais.

Conforme Pimenta (1966), as experiências anteriores às de Darcy eram feitas algumas em pequenos canais artificiais de rugosidade indeterminada e outras em cursos de água naturais, de forma que os dados obtidos não podiam fornecer uma visão do conjunto dos fatores intervenientes. Melhores resultados foram obtidos a pedido de Darcy por volta de 1865.

Na época atual ainda é problemática a obtenção de dados de qualidade na bibliografia especializada. De acordo com Silva (1992), muitos ensaios de laboratório em escoamento turbulento uniforme não geram dados de vazão, profundidade e declividade com suficiente acuidade para aplicações mais sensíveis como a de von Karman - Prandtl. A própria característica do escoamento uniforme requer consideração especial quanto à ocorrência de perfis do tipo S2, S3, M1 ou M2¹, dependendo das condições de alimentação e descarga do canal ensaiado. O escoamento uniforme para ser atingido satisfatoriamente portanto, requer um traçado de perfis de escoamento em tempo real, regulando-se as comportas a montante e a jusante até atingir-se um perfil de profundidade constante em um processo de tentativa e erro extremamente delicado.

¹ Os termos S e M referem-se a declividade maior ou menor que a crítica, respectivamente. M1 e S2 com altura do escoamento maior do que a normal, e, M2 e S3, menor.

O custo elevado na obtenção dessas condições, dos equipamentos de medição, das estruturas de fundo móvel, geralmente utilizadas, justificam a escassez de dados laboratoriais de escoamento turbulento em canais.

Na década de 60 o pesquisador brasileiro Carlito Flávio Pimenta realizou uma série de experimentos publicados no trabalho intitulado “Contribuição para o Cálculo da Perda de Carga nos Canais em Regime Uniforme”(1966). Os ensaios foram realizados no laboratório de hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Nas seções circulares, os diâmetros nominais utilizados foram de 300 e 400mm. O canal ensaiado tinha o comprimento total de 17,5m. O material utilizado constituía-se em tubos de cimento amianto do tipo ponta e bousa, com juntas confeccionadas de forma a não apresentarem singularidades. A rugosidade da parede lisa foi obtida com a colagem de um lençol de borracha laminado em estado natural com espessura de 3mm. Os tubos foram montados sob uma viga móvel de forma a permitir a variação da declividade do canal de 0,25 até 35mm/m. A alimentação dos canais foi feita através de um reservatório de nível constante de forma a garantir o regime permanente de escoamento (figura 10).

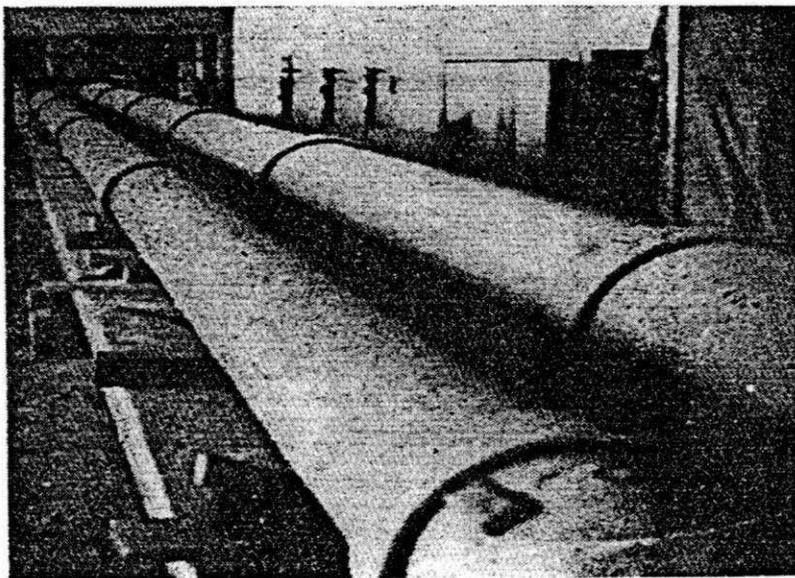


Figura 10 – Vista do experimento de Pimenta (1966) - Laboratório de hidráulica da Poli-USP.

No experimento foram obtidos dados de vazão, temperatura da água, profundidade de escoamento e declividade do fundo do canal. As vazões foram medidas com um vertedor de parede delgada e o erro estimado variou de 0,6 a 1,2%. A temperatura foi

medida com um termômetro simples de laboratório com apreciação de até um quarto de grau centígrado. As profundidades foram obtidas por dois processos distintos: pontas milimétricas que permitiam a leitura do décimo do milímetro instaladas sobre o canal e tomadas de pressão instaladas no fundo do canal e ligadas a vasos comunicantes. As profundidades foram medidas em três pontos do escoamento e calculado o valor médio. A leitura da declividade foi feita com três referências de nivelamento e teve erro estimado em 0,007mm/m.

Professor Pimenta não revela no relatório a forma utilizada para se evitar os perfis não uniformes descritos por Silva (1992). Admite inclusive que quando existia uma pequena variação entre as leituras da lâmina escoada nos três pontos de medição, o valor médio era adotado. Os valores obtidos por Pimenta são apresentados na planilha 1, juntamente com cálculos de diversos parâmetros hidráulicos relativos a esses dados.

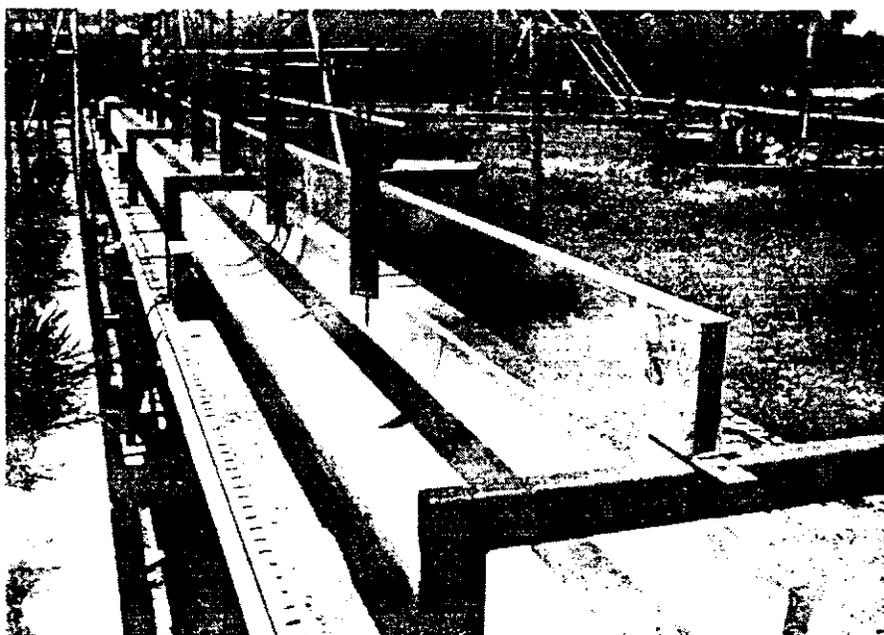


Figura 11 – Vista do experimento de Kazemipour e Apelt (1979) – Laboratório de Hidráulica da Universidade de Queensland.

Outro importante trabalho experimental foi desenvolvido por Kazemipour & Apelt (op. cit.) no laboratório de hidráulica da Universidade de Queensland na Austrália. O canal ensaiado tinha diâmetro interno de 380 mm e 21 metros de comprimento, montado sob

uma plataforma externa de fundo móvel. O canal de geometria semicircular foi construído com cimento amianto. As paredes do canal com espessura de 21mm foram preparadas internamente com selante a base de silicone e resina epoxi para garantir a estanqueidade e rugosidade lisa das paredes (figura 11).

No experimento, Kazemipour e Apelt (1979) obtiveram dados de vazão, temperatura da água, profundidade de escoamento e declividade do fundo do canal. As vazões foram medidas através de placas de orifício de 8,89 cm, instaladas em três tubulações de 15 cm de diâmetro que alimentavam um tanque de nível constante na entrada do canal. As profundidades foram medidas em 15 pontos do escoamento, sendo o primeiro ponto de medição instalado a 5 metros da entrada do canal e o último a cerca de 2 metros da saída. A resolução de cada ponto de medição foi estimado em 0,1 mm. A leitura da declividade foi feita de forma a se obter precisão da ordem de centésimo do milímetro. No experimento foram instaladas comportas de montante e jusante, que eram reguladas durante cada evento de forma a se evitar o efeito causado na leitura da lâmina escoada pela formação dos perfis não uniformes, dos tipos M e S, descritos anteriormente.

Com esses cuidados, cada ponto demorou até mais de uma hora para ser obtido, no entanto, o trabalho foi recompensado pela excelente qualidade dos resultados. Os dados de Kazemipour e Apelt (1979) são apresentados juntamente com diversos cálculos de parâmetros hidráulicos relativos a esses, no anexo 2 desta dissertação.

3 METODOLOGIA

3.1 Análise dos Dados

De acordo com diversos autores, a exemplo de Oliveira (1992), o fator de atrito para canais é maior do que para tubulações. Como a curva de Von Karman - Prandtl representa o escoamento em uma tubulação, logicamente os dados laboratoriais de escoamento em canais apresentam-se abaixo desta curva quando colocados no gráfico anteriormente descrito.

Kirschmer (1949), apud Pimenta (1966), observa serem paralelas as curvas do coeficiente de atrito f para canais em função do número de Reynolds e as curvas de von Karman - Prandtl, no escoamento turbulento liso.

Conforme Silva (1992), essa característica observada por Kirschmer pode servir para análise da qualidade de dados laboratoriais de escoamento em canais. A análise visual dessas duas características será utilizada como principal parâmetro para verificação da qualidade dos dados apresentados.

3.2 Análise Dimensional

De acordo com Silva (1992), as variáveis que afetam o escoamento turbulento uniforme em canais abertos são a velocidade média U , a área da seção transversal A , a largura de topo da seção transversal B , a profundidade média ou hidráulica y_{av} definida como A/B , o perímetro molhado da seção transversal P , a medida da altura rugosa das paredes do canal e , a declividade do fundo do canal ou da superfície livre do fluido S , a aceleração da gravidade

g, a massa específica da água ρ , a viscosidade dinâmica da água μ , e a tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento τ_o .

A análise dimensional desses grupos fornece uma função de grupos adimensionais através da aplicação do teorema π ou de Buckingham, apresentado por Fox (1998). De acordo com essa metodologia a forma dos parâmetros adimensionais depende da escolha dos elementos da base. Conforme Oliveira (1994), a equação seguinte apresenta um arranjo possível de grupos adimensionais desses elementos.

$$\phi_1 \left(\frac{B}{y_{av}}, \frac{P}{B}, \frac{e}{R}, \frac{U^2}{gSR}, \frac{R\sqrt{gSR}}{\nu}, \frac{\tau_o}{\rho gSR} \right) = 0 \quad (3.1)$$

onde R é o raio hidráulico e ν a viscosidade cinemática da água.

A tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento τ_o pode ser calculada por ρgRS . Quando faz-se essa substituição na equação anterior, o último termo torna-se desprezível. Dessa forma a equação 3.1 toma a seguinte forma.

$$\phi_1 \left(\frac{B}{y_{av}}, \frac{P}{B}, \frac{e}{R}, \frac{U^2}{gSR}, \frac{R\sqrt{gSR}}{\nu} \right) = 0 \quad (3.2)$$

Kazemipour e Apelt (1980) introduziram na equação anterior o termo f_c como sendo o fator de atrito para canais abertos. O número de Reynolds também foi introduzido e a equação 3.2 foi resolvida na seguinte forma.

$$1/f_c = \phi_2 \left(Re, \frac{e}{R}, \frac{B}{y_{av}}, \frac{P}{B} \right) \quad (3.3)$$

Na equação 3.3, observa-se que os dois últimos grupos adimensionais estão relacionados à forma da seção transversal do escoamento. Assim, a equação anterior pode ser reduzida à equação 3.4:

$$1/fc = \phi_2 \left(\text{Re}, \frac{e}{R}, \text{forma} \right) \quad (3.4)$$

A equação 3.4, quando aplicada a canais lisos, pode ser ainda reduzida no momento em que o segundo grupo adimensional, da rugosidade da parede do canal, for desprezado. Trabalhando dessa forma, o fator de atrito para canais lisos passa a ser uma função exclusiva do número de Reynolds associado ao efeito de forma da seção transversal do canal.

3.3 Adaptação da Método de Silva (1992) aos Canais de Seção Circular

A função \mathfrak{R} utilizada na metodologia de Silva (1992), apresentada na revisão de literatura, pode ser escrita na forma seguinte para canais de seção transversal circular:

$$\mathfrak{R} = \frac{1/4D^2 \{ \cos^2(1-2y/D) - (1-2y/D)[2y/D(2-2y/D)]^{1/2} \}}{\cos^2(1-2y/D)D} \quad (3.5)$$

A substituição da equação anterior na equação que representa a distribuição da tensão de cisalhamento na metodologia de Silva (1992) produz uma terceira equação de difícil solução analítica. No entanto, o parâmetro de forma ψ_t pode ser obtido a partir dos valores experimentais de Replogle e Chow (1966).

Para adequar a equação 2.23 nas características dos dados de Replogle e Chow (1966), esta pode ser rescrita na forma seguinte:

$$\psi_t = \frac{\rho g S \Delta x \int_P \mathfrak{R} dl}{\rho g R S \Delta x P} = \frac{\frac{1}{P} \int_P \tau dl}{\tau_0} = \frac{1}{P} \int_P \frac{\tau}{\tau_0} dl \quad (3.6)$$

3.4 Ajuste Polinomial do Método de Kazemipour

O modelo desenvolvido por Kazemipour e Apelt (1980), denominado método de Kazemipour, considera dois parâmetros adimensionais para representar o feito de forma no escoamento turbulento uniforme em canais circulares. O primeiro, $\psi_1 = (P/D)^{1/2}$, é obtido diretamente com o valor do perímetro molhado e o diâmetro do tubo. No entanto, o segundo parâmetro é uma função do diâmetro e da altura y_D ($\psi_2 = F(D/y_D)$), que representam a forma da geometria característica da seção transversal. Pela sua feição, o segundo parâmetro, obtido dos dados de laboratório, é fornecido apenas de forma gráfica. Neste caso, existe a impossibilidade da utilização de um programa computacional na solução do problema quando da utilização do método de Kazemipour, e também da comparação deste com outros métodos existentes.

Para se adaptar o método de Kazemipour à formulação puramente matemática, necessita-se da equação da curva apresentada na figura 2.6, parâmetro ψ_2 versus D/y_D , não fornecida apesar de ser o melhor ajuste aos pontos plotados no gráfico, segundo Kazemipour e Apelt (1980).

A substituição da curva da figura 2.6 por uma equação que melhor aproxime-a foi feita ajustando-se aos dados (D/y_D , ψ_2) tirados diretamente da curva e fazendo-se a seguinte mudança de variáveis proposta por Silva e Figueiredo (1993):

$$X = C_1 + \ln(D/y_D) \quad (3.7)$$

$$Y = C_2 + \ln \psi_2 \quad (3.8)$$

sendo X e Y variáveis auxiliares, respectivamente, independente e dependente. A introdução das constantes C_1 e C_2 tem por finalidade evitar valores negativos de X e Y . Nesse caso, $C_1 = C_2 = 1$.

Feito o ajuste, ψ_2 pode ser então obtido na equação 3.9 proposta Silva e Figueiredo (1993).

$$\psi_2 = \exp \left\{ \sum_{i=0}^n a(i) (C_1 + \ln(D/y_D))^i \right\} - C_2 \quad (3.9)$$

onde $a(i)$ são os coeficientes e n o grau do polinômio ajustado que relaciona as variáveis X e Y .

3.5 Comparação entre os Métodos...

A comparação entre o método de Kazemipour e Apelt (1980) e o desenvolvido por Silva (1992), adaptado neste trabalho para o caso de seções circulares, é feita através dos parâmetros adimensionais utilizados para representar o efeito de forma nestes modelos.

O modelo de Silva (1992) utiliza-se de apenas um único parâmetro de forma ψ_t , que de acordo com seu comportamento, pode ser considerado constante em relação ao fator y/D , sendo seu valor extraído do gráfico de $\psi_t = 1,018$. Observa-se que se este parâmetro não varia em função de y/D (y/D e D/y_D podem ser calculados em função da área e do diâmetro).

O método de Kazemipour utiliza Apelt um parâmetro ψ composto por outros dois, ψ_1 e ψ_2 relacionados conforme a equação 2.4, onde $\psi_1 = (P/D)^{1/2}$. Por analogia com ψ_2 de Kazemipour, um segundo parâmetro de forma ψ_{2t} é sugerido no método de Silva (1992) para que se possibilite a comparação entre estes.

$$\psi_{2t} = \psi_1 / \psi_t \quad (3.10)$$

ou

$$\psi_{2t} = (P/D)^{1/2} / 1,018 \quad (3.11)$$

Dessa forma, a equação 3.11 permite uma melhor comparação entre as metodologias de Silva (1992) e Kazemipour e Apelt (1979), do que se fosse feita a análise de apenas um parâmetro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise dos Dados

Além dos dados de Pimenta (1966) e Kazemipour e Apelt (1979), experimentos descritos anteriormente, faz-se também a análise dos resultados utilizados por Nalluri & Adepoju (1985) no trabalho "*Shape Effects on Resistance to Flow in Smooth Channels of Circular Cross Sections*".

A tabela 1 apresenta a faixa de variação de alguns parâmetros hidráulicos de interesse na aplicação do modelo para os dados de Pimenta (1966), Kazemipour e Apelt (1979) e Nalluri & Adepoju (1985).

Tabela 1 - Faixa de variação dos valores hidráulicos.

Autor	Nº de medidas	N. Froude ($=V/\sqrt{g.y}$)	N. Reynolds ($=4RV/\nu$)	y/D
Pimenta (1966)	137	0,31 – 5,46	23800 - 951000	0,05 – 0,50
K. e Apelt (1979)	80	0,31 – 1,83	69450 - 476790	0,10 – 0,42
Máy (1985)	17	0,46 – 1,43	50000 - 200000	0,35 – 0,87
N. e Adepoju (1985)	53	0,16 – 0,94	30000 - 300000	0,21 – 0,85

Para se fazer a correção do coeficiente de atrito de acordo com o modelo desenvolvido por Silva (1992) e possibilitar a análise crítica dos dados, cada conjunto de valores é representado de forma gráfica juntamente com a equação de Von Karman-Prandtl, para tubos lisos. Na abcissa, a raiz do fator de atrito versus o número de Reynolds, na ordenada o inverso da raiz do fator de atrito (figuras 12, 13, e 14).

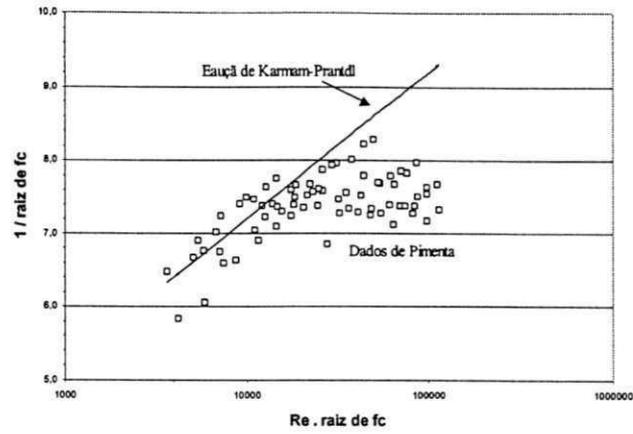


Figura 12 – Dados de Pimenta (1966) e equação de Von Karman – Prandtl.

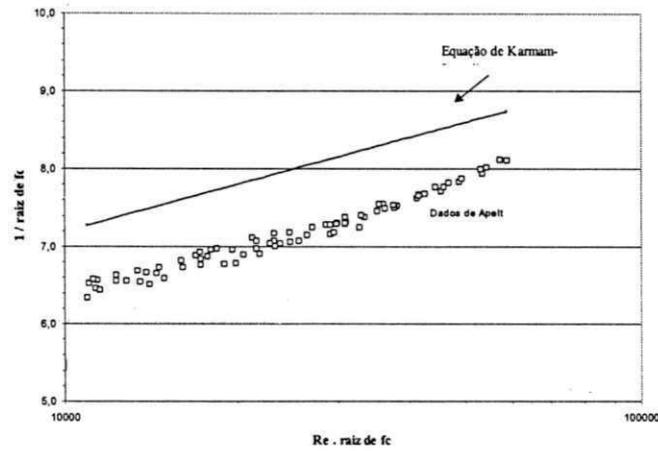


Figura 13 – Dados de Kazemipou e Apelt (1979) e equação de Von Karman – Prandtl.

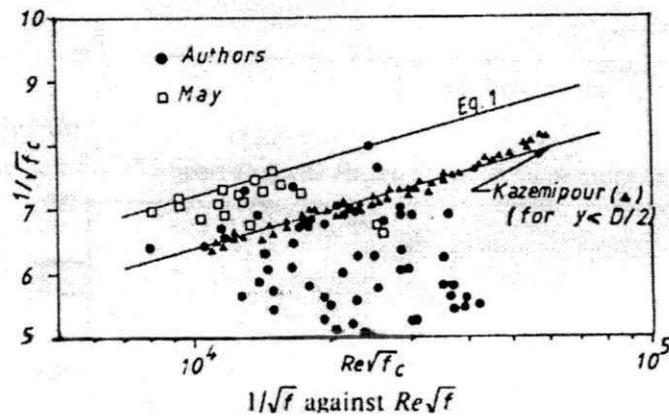


Figura 14 – Dados utilizados por Adepoju (1985) e equação de von Karman – Prandtl (Nalluri e Adepoju, 1985).

Na figura 12, diversos pontos dos dados de Pimenta apresentam-se acima da curva de Von Karman para valores da abcissa menores 50000, o que provoca desacordo com a primeira característica de análise. A condição de paralelismo descrita por Silva (1992) também não se verifica, já que os dados distanciam-se da reta de Von Karman a medida que aumenta os valores da abcissa. Dessa forma, de acordo com a análise desses dois parâmetros, os dados de Pimenta apresentam-se com baixa acuidade.

Na figura 13, os dados de Apelt (1966) situam-se abaixo da equação de Von Karman em toda extensão dos valores da abcissa. A tendência de paralelismo entre a equação de Von-Karman e os dados também é verificada. Sendo assim, esses dados satisfazem as duas características de avaliação.

Na figura 14, observa-se três conjuntos de dados utilizados por Nalluri & Adepoju (1985): os de May, os valores produzidos pelos próprios autores, e, os dados de Apelt (1979) que já foram analisados na figura 3.5. Os dados de May satisfazem a primeira condição, pois nenhum valor está acima da equação de Von-Karman. A condição de paralelismo é razoavelmente satisfeita pois apenas dois pontos distanciam-se dessa característica. Os dados produzidos por Nalluri & Adepoju não satisfazem a primeira condição e a forma na qual está disposta a nuvem de valores dificulta a avaliação de acordo com a segunda característica.

A análise das figuras 12, 13, e 14, de acordo com os dois parâmetros utilizados, apresentam com melhor resultado os dados produzidos por Kazemipour & Apelt (1979). A qualidade do experimento desenvolvido por esses pesquisadores na universidade de Queensland pode ser melhor entendida observando alguns pontos, com referência ao experimento de Pimenta (1966). A tabela 2 apresenta alguns parâmetros para comparação entre os dois experimentos.

Tabela 2 – Comparação entre os experimentos de Apelt (1979) e Pimenta (1966).

Parâmetro avaliado	Apelt (1979)	Pimenta (1966)
comprimento do canal	21m	17,5m
Número de pontos de leitura da lâmina escoada	15	3
Precisão na leitura da lâmina escoada	0,1mm	0,1mm
Equipamento para leitura da vazão	placa de orifício	vertedor
Precisão na leitura da declividade	0,001mm/m	0,007mm/m

Outro importante fator é o delicado procedimento, comentado anteriormente, executado por Apelt (1973), para se evitar a formação dos perfis não uniformes dos tipos M ou S. Pimenta (1966) não apresenta em seu relatório do experimento nenhum cuidado adicional quanto a esse fator, afirma inclusive que quando existia uma pequena diferença entre a leitura dos três pontos de medição da lâmina escoada, o valor médio era adotado.

De posse dessa análise, opta-se por utilizar os dados produzidos por Kazemipour & Apelt (1979) como base para aplicação do modelo desenvolvido por Silva (1992), para o cálculo da resistência ao escoamento uniforme turbulento em canais circulares.

4.2 Adaptação do Modelo de Silva (1992) aos Canais Circulares – Obtenção do Parâmetro de Forma

As curvas da figura 1, obtidas por Replogle e Chow (1966), apresentada na revisão bibliográfica desta dissertação, relacionam a razão entre a tensão de cisalhamento e seu valor médio com o perímetro molhado para três diferentes valores da altura do escoamento sobre o diâmetro interno da estrutura do canal. Estas curvas foram inseridas no programa EXCEL e em cada caso foram obtidas através do programa as equações que melhor as representassem.

Na equação 3.6 a variável l deve percorrer todo o perímetro molhado. No entanto, devido a simetria da distribuição da tensão de cisalhamento, Replogle e Chow (1966) apresentam seus dados para l variando de zero até $P/2$. Dessa forma a equação 3.6 fica:

$$\psi_r = \frac{1}{P} \int_0^{P/2} \frac{\tau}{\tau_0} dl = \frac{2}{P} \int_0^{P/2} \frac{\tau}{\tau_0} dp \quad (4.1)$$

mas, na figura 1, $y = \tau/\tau_0$ e $x = p/P$, então $p = xP$

logo,

$$dp = d(xP) = Pdx$$

assim a equação 4.1 toma a forma:

$$\psi_t = 2 \int_0^{1/2} \frac{\tau}{\tau_0} dx \quad (4.2)$$

Devido as características das curvas de distribuição de cisalhamento, para cada altura relativa, foram ajustadas duas funções, avaliadas de acordo com o parâmetro estatístico r^2 , fornecido pelo EXCEL. Para y/D igual a $1/3$, foram as seguintes:

a) $y = 30x$, $0 < x < 0,02$ ($r^2 = 1,00$)

b) $y = 0,1755 \ln x + 1,3112$, $0,02 < x < 0,5$ ($r^2 = 0,99$)

A aplicação de 4.2 nas equações anteriores fornece:

$$\psi_t = 2 \left\{ \int_0^{0,02} 30x dx + \int_{0,02}^{0,5} [0,1755 \ln(x) + 1,3112] dx \right\} \quad (4.3)$$

ou

$$\psi_t = 1,008 \quad (y/D = 1/3)$$

Para y/D igual a $1/2$, tem-se as seguintes equações:

c) $y = 91,25x$, $0 < x < 0,008$ ($r^2 = 1,00$)

d) $y = -1,0976x^2 + 1,1645x + 0,8382$, $0,008 < x < 0,5$ ($r^2 = 0,99$)

Mais uma vez, a aplicação de 4.2 nas equações c e d, fornece:

$$\psi_t = 2 \left\{ \int_0^{0,008} 91,25x dx + \int_{0,008}^{0,5} (-1,0976x^2 + 1,1645x + 0,8382) dx \right\} \quad (4.4)$$

ou

$$\psi_t = 1,030 \quad (y/D = 1/2)$$

Para y/D igual a $2/3$ tem-se as seguintes equações:

$$e) y = 111,25x, \quad 0 < x < 0,008 \quad (r^2 = 1,00)$$

$$f) y = 3,4273x^3 - 3,5452x^2 + 1,3552x + 0,8729, \quad 0,008 < x < 0,5 \quad (r^2 = 0,98)$$

Mais uma vez, a aplicação de 4.2 nas equações e e f, fornece:

$$\psi_t = 2 \left\{ \int_0^{0,008} 111,25x dx + \int_{0,008}^{0,5} (3,4273x^3 + 3,5452x^2 + 1,3552x + 0,8729) dx \right\} \quad (4.5)$$

ou

$$\psi_t = 1,016 \quad (y/D = 2/3)$$

De posse dos valores obtidos das equações 4.3, 4.4 e 4.5, pode-se ter uma relação do parâmetro de forma proposto por Silva (1992), ψ_t , com o parâmetro geométrico y/D .

Apesar de ser composto apenas por três pontos, o gráfico da figura 15 possibilita uma análise crítica do comportamento da função.

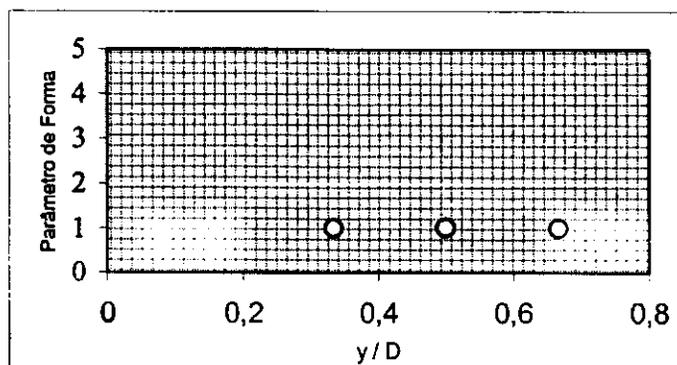


Figura 15 – Comportamento do parâmetro de forma ψ_t com o parâmetro geométrico y/D .

O comportamento constante da função do parâmetro de forma, observado da figura 15, está associado ao paralelismo entre os dados experimentais de escoamento uniforme livre e a equação de Von Karman – Prandtl escritos conforme a figura 13.

Os valores superiores à unidade refletem, no entanto, um problema já que a tensão de cisalhamento resistiva não pode superar aquela devido à força que impulsiona o escoamento, calculada de acordo com a equação 2.22. Essa aparente anomalia é decorrente do fato de que no experimento de Replogle e Chow (1966) não se obteve a condição de perfeita uniformidade no escoamento. No relatório deste experimento é observada uma pequena diferença entre a declividade da superfície do fluido e do fundo do canal testado. Por sua vez, a equação 2.22 pressupõe regime uniforme em sua dedução.

4.3 Ajuste Polinomial do Método de Kazemipour

Os dados de Kazemipour e Apelt (1980), retirados da curva apresentada na figura 5, foram então lançados nas equações 3.7 e 3.8. Os valores obtidos fornecem o gráfico da figura 16 e com ele o polinômio que ajusta satisfatoriamente as variáveis X e Y.

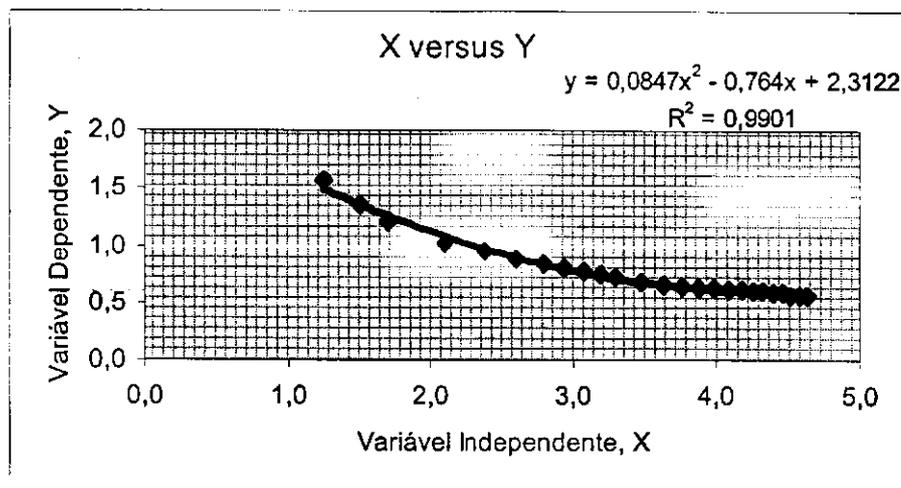


Figura 16 – Relação entre as variáveis X e Y.

O polinômio 4.6, que relaciona as variáveis X e Y, é considerado satisfatório devido ao elevado valor do parâmetro estatístico $r^2 = 0,9901$.

$$Y = 0,084X^2 - 0,764X + 2,312 \quad (4.6)$$

Aplicando a equação 4.6 na 3.9, tem-se finalmente uma função que represente analiticamente o segundo parâmetro do método de Kazemipour.

$$\psi_2 = \exp\{[0,084(1+\ln D/y_D)^2 - 0,764(1+\ln D/y_D) + 2,321] - 1\}$$

ou

$$\psi_2 = 1,864 \exp[0,084(\ln D/y_D)^2 - 0,589(\ln D/y_D)] \quad (4.7)$$

O gráfico da figura 17 apresenta os pontos do experimento de Kazemipour utilizados para traçar a curva de ψ_2 , e os valores deste parâmetro obtidos diretamente da equação 4.7. Os valores de ψ_2 calculados com a equação 4.7 mostraram-se bastante próximos aos da curva experimental de Kazemipour, o que justifica a adoção desta equação. Ademais, no método gráfico de obtenção de ψ_2 , pequenos erros de leitura não são raros o **que reforça o motivo da utilização da expressão 4.7** para o cálculo de ψ_2 no método de Kazemipour.

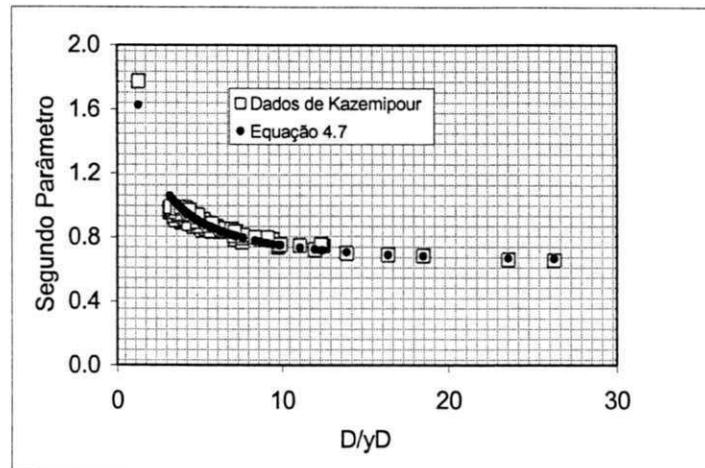


Figura 17 – Dados de Kazemipour e Apelt e equação 4.7.

4.4 Comparação entre os Métodos de Silva e Kazemipour

A figura 18 apresenta as curvas do parâmetro de forma ψ_{2t} calculados pela equação 5.37, e o segundo parâmetro de forma ψ_2 de Kazemipour.

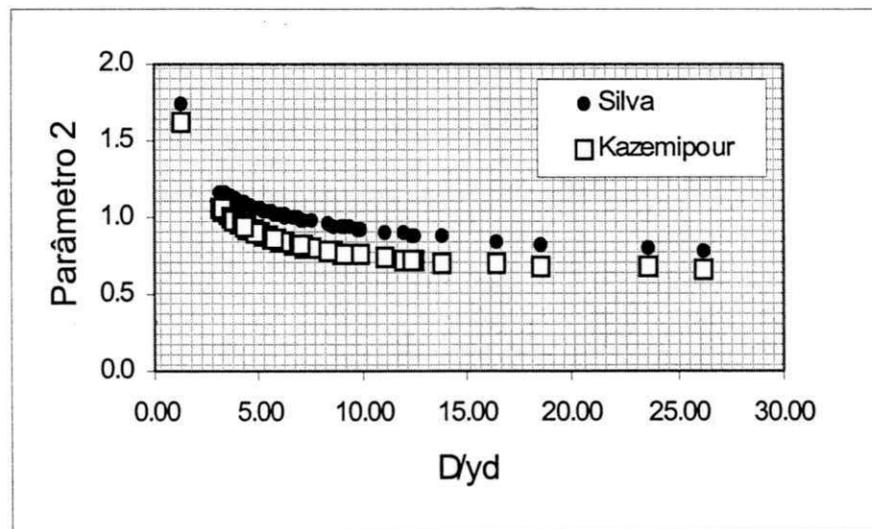


Figura 18 – Segundo parâmetro ψ_{2t} de Silva (1992), e ψ_2 do método de Kazemipour.

O parâmetro de ψ de Kazemipour pode ser obtido com a substituição da equação 4.7 na equação 2.4.

$$\psi = \frac{[\arcsos(1 - 2y/D)]^{1/2}}{1,864 \exp[0,084(\ln D/y_D)^2 - 0,589(\ln D/y_D)]} \quad (4.8)$$

A figura 19 apresenta as curvas do parâmetro de forma ψ_t proposto por Silva (1992) em função da variável D/y_D , e o parâmetro de forma ψ de Kazemipour, calculado através da equação 4.8.

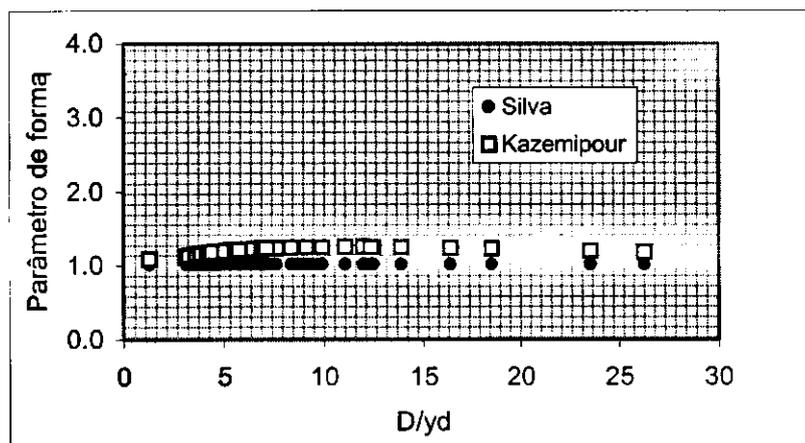


Figura 19 –Parâmetro ψ_t de Silva (1992), e ψ do método de Kazemipour.

As curvas apresentadas nas figuras 18 e 19 revelam um comportamento semelhante entre os parâmetros adimensionais de forma propostos por Silva (1992) e Kazemipour e Apelt (1980). Apesar da similaridade observada, a análise das curvas revela que os parâmetros de forma diferem entre si. Este fato reflete a necessidade de um ajuste no método Silva (1992) quando aplicado aos canais de seção transversal circular.

4.5 Aplicação dos Modelos

A aplicação dos modelos é feita em duas etapas, inicialmente os dados de laboratório são aplicados aos dois modelos, em seguida, é apresentado um procedimento de cálculo para aplicação em projetos, na forma de cálculo de vazão (a) e dimensionamento (b), utilizando o modelo de Kazemipour ajustado analiticamente.

4.5.1 Aplicação aos Dados de Laboratório

A aplicação dos modelos de Silva (1992) e Kazemipour (1980) aos dados laboratoriais de Kazemipour e Apelt (1980), é feita através do coeficiente de atrito modificado proposto em cada um destes modelos.

A figura 20 apresenta os dados laboratoriais do fator de atrito para canais f_c obtidos por Kazemipour e Apelt (1980) e a equação para tubos pressurizados de von Karmam – Prandtl (equação 2.1). **O paralelismo entre a reta que representa a equação de von Karmam-Prandtl e os dados laboratoriais é característico do escoamento turbulento uniforme em canais.** Cada metodologia busca reduzir a distância entre as retas, lançando os pontos no sentido da equação de von Karmam.

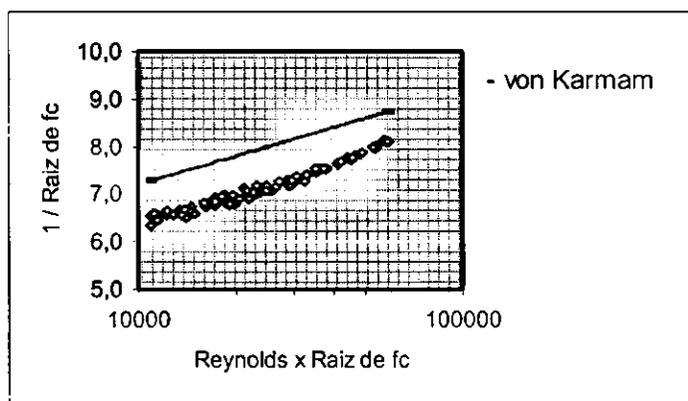


Figura 20 – Fator de atrito experimental f_c e a equação de von Karmam – Prandtl.

A figura 21 apresenta os dados do fator de atrito f^*t modificado, proposto no método de Silva (1992) e a equação para tubos pressurizados de von Karmam – Prandtl (equação 2.1). Observa-se que neste caso houve uma aproximação pouco significativa, que não justifica a adoção de cálculo de escoamento uniforme livre através de fórmulas racionais para tubulações pressurizadas, sendo feita apenas a correção segundo o parâmetro ψ .

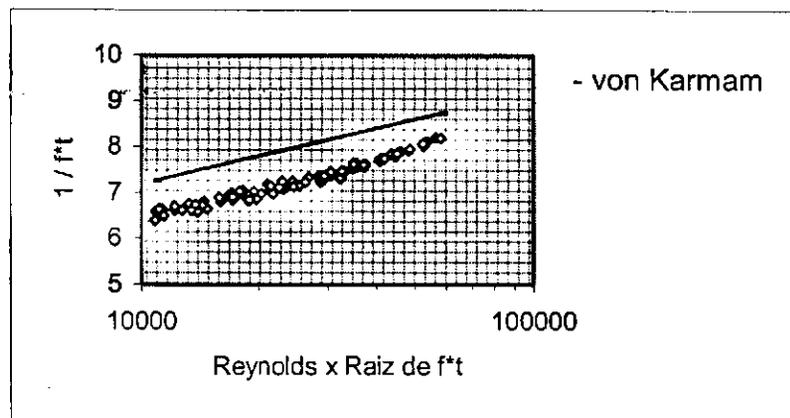


Figura 21 – Fator de atrito f^*t modificado pelo método de Silva (1992) e a equação para tubos pressurizados de von Karmam – Prandtl.

A figura 22 apresenta os dados do fator de atrito f^* modificado, proposto no método de Kazemipour e a equação para tubos pressurizados de von Karmam – Prandtl (equação 2.1). Neste caso os pontos sobrepuseram a reta da equação de von Karmam, o que indica a possibilidade de adoção de cálculo de escoamento uniforme livre através de fórmulas racionais para tubulações pressurizadas sendo feita apenas a correção segundo o parâmetro ψ proposto por Kazemipour e Apelt (1980).

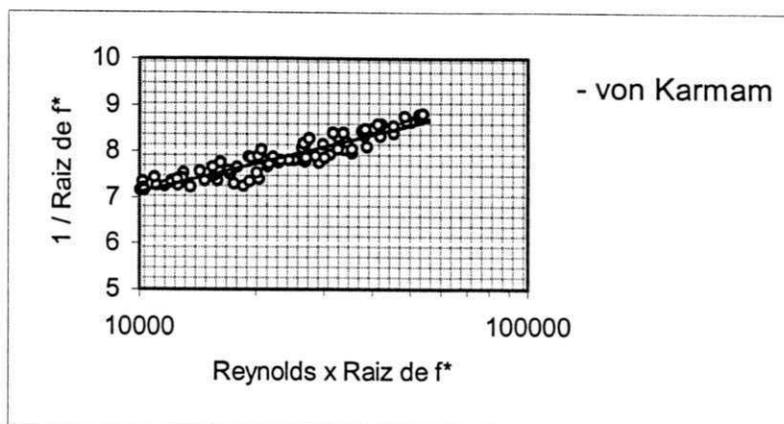


Figura 22 – Fator de atrito f^* modificado e a equação para tubos pressurizados de von Karmam – Prandtl.

4.5.2 Algoritmo para Aplicação em Projetos

- a) **Cálculo de Vazão – Dados a altura hidráulica y , a declividade do fundo S , o diâmetro do canal D , e a viscosidade cinemática da água ν , para determinar a vazão escoada em regime turbulento uniforme em canais lisos, segue-se a seguinte rotina:**
- i) Calcula-se o parâmetro de forma ψ através da equação 4.8;
 - ii) Calcula-se a parcela $Re\sqrt{f}$ da “fórmula universal” de Darcy-Weisbach escrita para canais na seguinte forma: $Re\sqrt{f} = [128R^3gS / \nu^2\psi]^{1/2}$;
 - iii) Obtém-se f da equação 2.1;
 - iv) Calcula-se $f_c = f\psi$;
 - v) Calcula-se a velocidade U através da equação seguinte:

$$U = \sqrt{\frac{8gRS}{f_c}}$$

vi) Finalmente, $Q = A.U$

b) Dimensionamento – Dados a vazão escoada Q , a declividade do fundo S , a viscosidade cinemática da água ν , para verificar a altura hidráulica referente ao escoamento turbulento uniforme liso num canal de diâmetro D , segue-se a seguinte rotina:

i) **Adota-se um valor inicial para a altura hidráulica y .** Nesse caso é sugerido um valor inicial menor que a metade do diâmetro interno do canal.

ii) Calcula-se o parâmetro de forma ψ através da equação 4.8;

iii) Determina-se o raio hidráulico R ;

iv) Calcula-se U , $U = Q/A$;

v) Obtém-se f da equação 2.1;

vi) Calcula-se o novo valor de y através substituição da fórmula que exprime a área em função de y na equação seguinte:

$$A = Q \sqrt{\frac{f\psi}{8RgS}}$$

vii) Repete-se o procedimento a partir do item ii até que o valor de y encontrado seja satisfatoriamente próximo ao anterior. A tolerância no erro deve ser adotada pelo projetista de acordo com as condições de projeto.

4.5.3 Aplicações Práticas

Aplicação 1: Dimensionamento – Em um canal circular liso com diâmetro igual a 39,03 cm e declividade de 0,0050 m/m, escoo uma vazão uniforme de 61,80 l/s a uma temperatura de 24,0°C ($\nu=9,11 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$). Calcular a profundidade hidráulica do escoamento.

Solução:

Admitindo-se o valor inicial para a altura hidráulica $y = 18 \text{ cm}$, a área de escoamento pode ser calculada, e com ela a altura y_D ;

$$A = 39,03^2/8 \{ 2\cos^{-1}(1-2.18/39,03) - 4(1-2.18/39,03)[18/39,03(1-18/39,03)]^{1/2} \}$$

$$\therefore A = 539,15 \text{ cm}^2$$

$$y_D = A/D$$

$$\therefore y_D = 13,81 \text{ cm}$$

De posse destes valores, calcula-se ψ através da equação 4.8:

$$\psi = \frac{(\cos^{-1}(1 - 2.18/39,03))^{1/2}}{1,864 \exp[0,084(\ln 39,03/13,81)^2 - 0,589(\ln 39,03/13,81)]}$$

$$\therefore \psi = 1,104$$

Determina-se então o perímetro molhado P e o raio hidráulico R :

$$P = 39,03 \cos^{-1}(1 - 2.18/39,03)$$

$$\therefore P = 58,275 \text{ cm}$$

$$R = A / P$$

$$\therefore R = 9,252 \text{ cm}$$

Calcula-se U , $U = Q/A$, e o número de Reynolds Re :

$$\therefore U = 114,62 \text{ cm/s}$$

$$Re = UD/\nu$$

$$\therefore Re = 491213,5$$

Obtém-se f da equação 2.1:

$$f^{-1/2} = 2 \log(491213,5 \cdot f^{1/2}) - 0,8$$

$$\therefore f = 0,013$$

Finalmente, através da equação seguinte, calcula-se o novo valor da área e seu respectivo valor de y :

$$A = Q[(f\psi) / (8RgS)]^{1/2}$$

$$\therefore A = 388,56 \text{ cm}^2$$

$$\therefore y = 14,1 \text{ cm}$$

Nesse caso, repetindo-se o procedimento uma vez, o valor de y encontrado é de $y = 14,9$ cm. Na 3ª iteração o valor obtido é de 15,0 cm. Para uma tolerância de 0,1cm, a terceira iteração já fornece um valor suficiente.

$$\therefore y = 15,0 \text{ cm}$$

Aplicação 2: Cálculo de vazão – Calcular a vazão em um canal circular liso com diâmetro interno de 29,34 cm, altura hidráulica $y = 7,34$ cm e declividade do fundo de 0,03409 m/m, que transporta água em escoamento uniforme a uma temperatura de 24,5°C ($\nu = 9,00 \times 10^{-3}$ cm²/s).

possibilidade é importante visto a crescente tendência de se resolver problemas de engenharia através de programas computacionais.

6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- a) Na atual fase do desenvolvimento da mecânica dos fluidos, os modelos hidráulicos produzidos requerem dados de laboratório para que sejam validados. No caso de escoamento uniforme em canais, os procedimentos laboratoriais são complexos e onerosos. A própria característica do escoamento uniforme requer consideração especial quanto a formação dos perfis do escoamento gradualmente variado dos tipos S2, S3, M1 ou M2, descritos no capítulo 3 desta dissertação. Quem trabalha na obtenção de modelos para aplicação em escoamento uniforme em canais carece de uma maior quantidade e qualidade de dados do que se dispõe na literatura atual. Existe então a necessidade do desenvolvimento de pesquisas de laboratório que objetivem a obtenção de dados de escoamento uniforme em canais com suficiente acuidade para aplicações mais sensíveis e rigorosas.

- b) Sugere-se o aprimoramento do procedimento aqui desenvolvido no sentido de se obter uma metodologia puramente analítica que contemple os efeitos da forma da geometria da seção transversal no cálculo do escoamento uniforme livre em canais circulares. Neste sentido deve-se buscar uma solução analítica para a equação 5.21, através da integral da função \mathfrak{R} . Os resultados assim obtidos devem ser avaliados. Posteriormente, pode-se considerar o escoamento uniforme como rotacional no sentido de introduzir novos termos na equação 5.21 que contabilizem as dissipações de energia não somente como decorrente do escoamento na direção principal, mas também das correntes secundárias.

- c) Sugere-se a aplicação dos modelos apresentados nesta pesquisa para o caso de seções transversais ainda não estudadas à luz destas metodologias. Por exemplo o caso de seções de cursos d'água com calha principal e planícies de inundação laterais com diversas tipologias.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COKLJAT D. AND YOUNIS B. A., "Second-Closure Study of Open-Channel Flows", **Journal of Hydraulic Engineering**, Proc. ASCE, Vol. 121, número 7065, pp 94-107, February, 1995.

FOX, R. W. & McDONALD, A. L. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Indiana: LTC editora, 5ª edição, 1998.

GERARD, R, "Secondary Flow in Noncircular Conduits", **Journal of the Hydraulics Division**, Proc. ASCE, Vol. 99, número HY5, pp 755-773, Maio, 1978.

JAYAMARAM, V.V. "Resistance Studies on Smooth Open Channels", **Journal of the Hydraulics Division**, Proc. ASCE, Vol. 96, número HY5, pp 1129-1141, May, 1970.

MAGALHÃES, C. A. C., "Dimensionamento dos Sistemas de Esgotos Sanitários de Grande Porte Via Redução de Custos", Dissertação de mestrado apresentado ao curso de pós-graduação em Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos / SP, 1995.

NALLURI, C. AND ADEPOJU, B. A., "Shape Effects on Resistance to Flow in Smooth Channels of Circular Cross-Section" ", **Journal of Hydraulic Research**, vol. 23, número 1, 1985.

KAZEMIPOUR A. K. & APELT C. J., " Shape Effects on Resistance to Smooth Semi-Circular Channels", Research Report nº. CE 18, Department of Civil Engineering, University of Queensland, november, 1980.

KAZEMIPOUR A. K., "Cross-Sectional Shape Effects on Resistance to Uniform Flow in Non-Circular Closed Conduits", Tese de doutorado submetida a Universidade de Queensland para obtenção do título de Doctor of Philosophy, Austrália, 1979.

KIRKGOZ, M. S. AND ARDIÇHOGLU, M., "Velocity Profiles of Developing and Developed Open Channel Flow" *Journal of the Hydraulics Engineering*, vol. 123, número 12, pp 1099-1105, Dec, 1997.

OLIVEIRA, J. M. S., "Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais Triangulares Lisos", dissertação de mestrado apresentado ao curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFPB. João Pessoa, 1994.

PIMENTA, C. F., "Contribuição Para o Cálculo da Perda de Carga nos Canais em Regime Uniforme", Tese apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o concurso ao cargo de Professor Catedrático da disciplina Hidráulica Geral, São Paulo / SP, 1966.

POWELL, R. W., "Flow in Channel of Definitive Roughness", *Proc. ASCE*, vol. 70, número HY2, pp 1521-1544, 1944.

REPLOGLE, J. A. E CHOW, V. T., "Tractive-force Distribution in Open Channels", *Journal of the Hydraulics Division*, *Proc. ASCE*, vol. 92, número HY2, pp 169-191, 1966.

SHIH C. C. ; GRIGG, "A Reconsideration of the Hydraulic Radius as a Geometric Quantity in Open Channel Hydraulics", *Proc. 12th Congress, I.A.R.H.*, Vol. 1, (Paper A36), Sept., 1967, pp288-296.

SILVA, T. C., "Efeitos de Forma na Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais", Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia Hidráulica, São Paulo / SP, 1992.

SILVA , T. C., “**Ajuste Polinomial: Três Estudos da Casos Utilizando Variáveis Transformadas**”, XIV Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia, São Paulo / SP, 1993.

FIGUEIREDO, P. H. S & SILVA, T. C, **Efeitos de Forma na Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais Trapezoidais**. X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Gramado / RS, 1993.

WPCF, “**Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers**” , Manual of Practice n° 9, 2ª edition, Water Pollution Control Federation, Washington, D.C., 1972.

APÊNDICE

Planiha 1 - Dados do Professor Pimenta e Cálculo dos Parâmetros Hidráulicos para Di=29,34cm

Teste	Di (m)	Yn (cm)	A (cm ²)	P (cm)	R (cm)	i (m/m)	Qmed (l/s)	V (cm/s)	T (°C)	vx10 ³ (cm/s)	fc 8gRi/V2	Rn 4RV/n	1/(fc) ^{u,b}	Rn(fc) ^{u,b}	Y _D A/D(cm)	Fr V/(gY _n) ^{0,5}	Fr V/(gY _D) ^{0,5}
1	0,2934	1,47	12,68	13,25	0,96	0,03409	1,43	112,41	24,5	9,00	0,020	47810	7,03	6805	0,43	2,96	5,46
2	0,2934	1,47	12,68	13,25	0,96	0,02500	1,18	92,69	24,5	9,00	0,022	39422	6,76	5828	0,43	2,44	4,50
3	0,2934	1,47	12,68	13,25	0,96	0,01956	1,03	80,86	24,5	9,00	0,022	34390	6,67	5155	0,43	2,13	3,93
4	0,2934	2,93	35,12	18,87	1,86	0,03409	5,80	165,16	24,5	9,00	0,018	136629	7,40	18460	1,20	3,08	4,82
5	0,2934	2,93	35,12	18,87	1,86	0,02500	4,90	139,54	24,5	9,00	0,019	115428	7,30	15808	1,20	2,60	4,07
6	0,2934	2,93	35,12	18,87	1,86	0,01956	4,40	125,30	24,5	9,00	0,018	103650	7,41	13983	1,20	2,34	3,66
7	0,2934	2,93	35,12	18,87	1,86	0,01510	3,85	109,64	24,5	9,00	0,018	90693	7,38	12286	1,20	2,04	3,20
8	0,2934	2,93	35,12	18,87	1,86	0,01010	3,20	91,13	24,5	9,00	0,018	75382	7,50	10048	1,20	1,70	2,66
9	0,2934	2,93	35,12	18,87	1,86	0,00511	2,05	58,38	24,5	9,00	0,022	48291	6,76	7147	1,20	1,09	1,70
10	0,2934	2,93	35,12	18,87	1,86	0,00180	1,05	29,90	24,0	9,11	0,029	24436	5,83	4191	1,20	0,56	0,87
11	0,2934	4,40	63,57	23,33	2,72	0,03409	12,50	196,62	24,5	9,00	0,019	238086	7,28	32691	2,17	2,99	4,26
12	0,2934	4,40	63,57	23,33	2,72	0,02500	10,08	158,48	24,5	9,00	0,021	191898	6,85	27995	2,17	2,41	3,44
13	0,2934	4,40	63,57	23,33	2,72	0,01956	9,60	151,01	24,5	9,00	0,018	182850	7,38	24763	2,17	2,30	3,28
14	0,2934	4,40	63,57	23,33	2,72	0,01510	8,60	135,28	24,5	9,00	0,018	163803	7,53	21757	2,17	2,06	2,93
15	0,2934	4,40	63,57	23,33	2,72	0,01010	7,10	111,68	24,5	9,00	0,017	135233	7,60	17794	2,17	1,70	2,42
16	0,2934	4,40	63,57	23,33	2,72	0,00511	4,80	75,50	24,5	9,00	0,019	91425	7,22	12657	2,17	1,15	1,64
17	0,2934	4,40	63,57	23,33	2,72	0,0018	2,60	40,90	24,0	9,11	0,023	48924	6,59	7421	2,17	0,62	0,89
18	0,2934	4,40	63,57	23,33	2,72	0,00111	1,88	29,49	24,5	9,00	0,027	35713	6,05	5899	2,17	0,45	0,64
19	0,2934	4,40	63,57	23,33	2,72	0,00043	1,25	19,66	24,5	9,00	0,024	23809	6,48	3672	2,17	0,30	0,43
20	0,2934	5,87	96,31	27,21	3,54	0,03409	21,50	223,24	24,5	9,00	0,019	351154	7,25	48403	3,28	2,94	3,93
21	0,2934	5,87	96,31	27,21	3,54	0,02500	18,50	192,09	24,5	9,00	0,019	302156	7,29	41450	3,28	2,53	3,39
22	0,2934	5,87	96,31	27,21	3,54	0,01956	16,50	171,32	24,5	9,00	0,019	269491	7,35	36664	3,28	2,26	3,02
23	0,2934	5,87	96,31	27,21	3,54	0,01510	14,75	153,15	24,5	9,00	0,018	240908	7,48	32214	3,28	2,02	2,70
24	0,2934	5,87	96,31	27,21	3,54	0,01010	12,25	127,19	24,5	9,00	0,017	200076	7,59	26346	3,28	1,68	2,24
25	0,2934	5,87	96,31	27,21	3,54	0,00511	8,60	89,30	24,5	9,00	0,018	140462	7,50	18740	3,28	1,18	1,57
26	0,2934	5,87	96,31	27,21	3,54	0,0018	4,80	49,84	24,0	9,11	0,020	77451	7,05	10988	3,28	0,66	0,88
27	0,2934	5,87	96,31	27,21	3,54	0,00111	3,55	36,86	24,5	9,00	0,023	57981	6,64	8734	3,28	0,49	0,65
28	0,2934	5,87	96,31	27,21	3,54	0,00043	2,30	23,88	24,5	9,00	0,021	37565	6,91	5436	3,28	0,31	0,42
29	0,2934	7,34	132,31	30,74	4,30	0,03409	32,00	241,87	24,5	9,00	0,020	462717	7,13	64923	4,51	2,85	3,64

Planiha 1 - Dados do Professor Pimenta e Cálculo dos Parâmetros Hidráulicos para Di=29,34cm (continuação)

Teste	Di (m)	Yn (cm)	A (cm ²)	P (cm)	R (cm)	i (m/m)	Qmed (l/s)	V (cm/s)	T (°C)	v×10 ³ (cm/s)	fc 8gRi/V2	Rn 4RV/n	1/(fc) ^{u,b}	Rn(fc) ^{u,b}	Y _D A/D(cm)	Fr V/(gY _n) ^{0,5}	Fr V/(gY _D) ^{0,5}
30	0,2934	7,34	132,31	30,74	4,30	0,02500	28,00	211,63	24,5	9,00	0,019	404877	7,28	55597	4,51	2,49	3,18
31	0,2934	7,34	132,31	30,74	4,30	0,01956	25,00	188,96	24,5	9,00	0,019	361498	7,35	49178	4,51	2,23	2,84
32	0,2934	7,34	132,31	30,74	4,30	0,01510	22,50	170,06	24,5	9,00	0,018	325348	7,53	43209	4,51	2,00	2,56
33	0,2934	7,34	132,31	30,74	4,30	0,01010	18,50	139,83	24,5	9,00	0,017	267508	7,57	35338	4,51	1,65	2,10
34	0,2934	7,34	132,31	30,74	4,30	0,00511	13,25	100,15	24,5	9,00	0,017	191594	7,62	25136	4,51	1,18	1,51
35	0,2934	7,34	132,31	30,74	4,30	0,0018	7,60	57,44	24,0	9,11	0,018	108568	7,37	14738	4,51	0,68	0,86
36	0,2934	7,34	132,31	30,74	4,30	0,00111	5,60	42,33	24,5	9,00	0,021	80975	6,91	11715	4,51	0,50	0,64
37	0,2934	7,34	132,31	30,74	4,30	0,00043	3,65	27,59	24,5	9,00	0,019	52779	7,24	7292	4,51	0,33	0,41
38	0,2934	8,80	170,54	34,01	5,01	0,03409	45,50	266,80	24,5	9,00	0,019	594616	7,28	81630	5,81	2,87	3,53
39	0,2934	8,80	170,54	34,01	5,01	0,02500	39,50	231,62	24,5	9,00	0,018	516205	7,38	69904	5,81	2,49	3,07
40	0,2934	8,80	170,54	34,01	5,01	0,01956	35,00	205,23	24,5	9,00	0,018	457397	7,40	61833	5,81	2,21	2,72
41	0,2934	8,80	170,54	34,01	5,01	0,01510	32,00	187,64	24,5	9,00	0,017	418191	7,70	54328	5,81	2,02	2,48
42	0,2934	8,80	170,54	34,01	5,01	0,01010	26,50	155,39	24,5	9,00	0,016	346315	7,79	44432	5,81	1,67	2,06
43	0,2934	8,80	170,54	34,01	5,01	0,00511	19,25	112,88	24,5	9,00	0,016	251568	7,96	31604	5,81	1,21	1,49
44	0,2934	8,80	170,54	34,01	5,01	0,0018	11,00	64,50	24,0	9,11	0,017	142017	7,66	18531	5,81	0,69	0,85
45	0,2934	8,80	170,54	34,01	5,01	0,00111	8,00	46,91	24,5	9,00	0,020	104548	7,10	14730	5,81	0,50	0,62
46	0,2934	8,80	170,54	34,01	5,01	0,00043	5,20	30,49	24,5	9,00	0,018	67956	7,41	9168	5,81	0,33	0,40
47	0,2934	10,27	210,92	37,15	5,68	0,03409	59,00	279,73	24,5	9,00	0,019	705855	7,18	98343	7,19	2,79	3,33
48	0,2934	10,27	210,92	37,15	5,68	0,02500	52,00	246,54	24,5	9,00	0,018	622110	7,39	84217	7,19	2,46	2,94
49	0,2934	10,27	210,92	37,15	5,68	0,01956	46,00	218,10	24,5	9,00	0,018	550328	7,39	74493	7,19	2,17	2,60
50	0,2934	10,27	210,92	37,15	5,68	0,01510	42,00	199,13	24,5	9,00	0,017	502473	7,68	65451	7,19	1,98	2,37
51	0,2934	10,27	210,92	37,15	5,68	0,01010	34,50	163,57	24,5	9,00	0,017	412746	7,71	53529	7,19	1,63	1,95
52	0,2934	10,27	210,92	37,15	5,68	0,00511	25,50	120,90	24,5	9,00	0,016	305073	8,01	38075	7,19	1,20	1,44
53	0,2934	10,27	210,92	37,15	5,68	0,0018	14,50	68,75	24,0	9,11	0,017	171378	7,68	22325	7,19	0,68	0,82
54	0,2934	10,27	210,92	37,15	5,68	0,00111	10,75	50,97	24,5	9,00	0,019	128609	7,25	17746	7,19	0,51	0,61

Planiha 1 - Dados do Professor Pimenta e Cálculo dos Parâmetros Hidráulicos para Di=29,34cm (continuação)

Teste	Di (m)	Yn (cm)	A (cm ²)	P (cm)	R (cm)	i (m/m)	Qmed (l/s)	V (cm/s)	T (°C)	v $\times 10^3$ (cm/s)	fc 8gRi/V ²	Rn 4RV/n	1/(fc) ^{0,5}	Rn(fc) ^{0,5}	Y _D A/D(cm)	Fr V/(gY _n) ^{0,5}	Fr V/(gY _D) ^{0,5}
55	0,2934	10,27	210,92	37,15	5,68	0,00043	6,90	32,71	24,5	9,00	0,018	82549	7,47	11045	7,19	0,33	0,39
56	0,2934	11,74	252,66	40,19	6,29	0,03409	76,00	300,80	24,5	9,00	0,019	840505	7,33	114597	8,61	2,80	3,27
57	0,2934	11,74	252,66	40,19	6,29	0,02500	67,00	265,18	24,5	9,00	0,018	740971	7,55	98137	8,61	2,47	2,89
58	0,2934	11,74	252,66	40,19	6,29	0,01956	59,00	233,52	24,5	9,00	0,018	652497	7,52	86805	8,61	2,18	2,54
59	0,2934	11,74	252,66	40,19	6,29	0,01510	54,00	213,73	24,5	9,00	0,016	597201	7,83	76269	8,61	1,99	2,33
60	0,2934	11,74	252,66	40,19	6,29	0,01010	44,00	174,15	24,5	9,00	0,016	486608	7,80	62377	8,61	1,62	1,89
61	0,2934	11,74	252,66	40,19	6,29	0,00511	33,00	130,61	24,5	9,00	0,015	364956	8,23	44368	8,61	1,22	1,42
62	0,2934	11,74	252,66	40,19	6,29	0,0018	18,75	74,21	24,0	9,11	0,016	204858	7,87	26015	8,61	0,69	0,81
63	0,2934	11,74	252,66	40,19	6,29	0,00111	13,75	54,42	24,5	9,00	0,018	152065	7,35	20679	8,61	0,51	0,59
64	0,2934	11,74	252,66	40,19	6,29	0,00043	8,90	35,23	24,5	9,00	0,017	98428	7,65	12870	8,61	0,33	0,38
65	0,2934	13,20	294,99	43,14	6,84	0,02500	83,00	281,36	24,5	9,00	0,017	855053	7,68	111308	10,05	2,47	2,83
66	0,2934	13,20	294,99	43,14	6,84	0,01956	73,00	247,46	24,5	9,00	0,017	752035	7,64	98456	10,05	2,17	2,49
67	0,2934	13,20	294,99	43,14	6,84	0,01510	67,00	227,12	24,5	9,00	0,016	690224	7,98	86506	10,05	2,00	2,29
68	0,2934	13,20	294,99	43,14	6,84	0,01010	54,00	183,06	24,5	9,00	0,016	556300	7,86	70749	10,05	1,61	1,84
69	0,2934	13,20	294,99	43,14	6,84	0,00511	40,50	137,29	24,5	9,00	0,015	417225	8,29	50323	10,05	1,21	1,38
70	0,2934	13,20	294,99	43,14	6,84	0,0018	23,00	77,97	24,0	9,11	0,016	234081	7,93	29507	10,05	0,69	0,79
71	0,2934	13,20	294,99	43,14	6,84	0,00111	17,25	58,48	24,5	9,00	0,017	177707	7,58	23454	10,05	0,51	0,59
72	0,2934	13,20	294,99	43,14	6,84	0,00043	11,00	37,29	24,5	9,00	0,017	113320	7,76	14598	10,05	0,33	0,38

Planiha 1 - Dados do Professor Pimenta e Cálculo dos Parâmetros Hidráulicos para Di=39,03cm

Teste	Di (m)	Yn (cm)	A (cm ²)	P (cm)	R (cm)	i (m/m)	Qmed (l/s)	V (cm/s)	T (°C)	vx10 ³ (cm/s)	fc 8gRi/V2	Rn 4RV/n	1/(fc) ^{0,5}	Rn(fc) ^{0,5}	Y _D A/D(cm)	Fr V/(gY _n) ^{0,5}	Fr V/(gY _D) ^{0,5}
1	0,3903	1,95	22,36	17,60	1,27	0,03450	2,60	116,25	24,0	9,11	0,025	64851	6,27	10346	0,57	2,66	4,90
2	0,3903	1,95	22,36	17,60	1,27	0,02505	2,38	106,19	24,5	9,00	0,022	59963	6,72	8924	0,57	2,43	4,48
3	0,3903	1,95	22,36	17,60	1,27	0,02011	2,20	98,37	25,5	8,88	0,021	56295	6,95	8104	0,57	2,25	4,15
4	0,3903	1,95	22,36	17,60	1,27	0,01465	1,77	79,14	25,0	8,90	0,023	45190	6,55	6901	0,57	1,81	3,34
5	0,3903	1,95	22,36	17,60	1,27	0,01033	1,33	59,47	25,0	8,90	0,029	33956	5,86	5795	0,57	1,36	2,51
6	0,3903	3,90	62,27	25,12	2,48	0,03450	10,70	171,84	24,0	9,11	0,023	187059	6,63	28203	1,60	2,78	4,34
7	0,3903	3,90	62,27	25,12	2,48	0,02505	9,75	156,58	24,5	9,00	0,020	172534	7,09	24326	1,60	2,53	3,96
8	0,3903	3,90	62,27	25,12	2,48	0,02011	9,15	146,95	25,5	8,88	0,018	164104	7,43	22090	1,60	2,37	3,71
9	0,3903	3,90	62,27	25,12	2,48	0,01465	7,50	120,45	25,0	8,90	0,020	134210	7,13	18812	1,60	1,95	3,04
10	0,3903	3,90	62,27	25,12	2,48	0,01033	5,70	91,54	25,0	8,90	0,024	101999	6,46	15797	1,60	1,48	2,31
11	0,3903	3,90	62,27	25,12	2,48	0,00500	3,82	61,35	24,0	9,11	0,026	66782	6,22	10737	1,60	0,99	1,55
12	0,3903	3,90	62,27	25,12	2,48	0,00208	2,48	39,83	24,0	9,11	0,026	43356	6,26	6925	1,60	0,64	1,01
13	0,3903	3,90	62,27	25,12	2,48	0,00110	1,63	26,18	24,0	9,11	0,031	28496	5,66	5036	1,60	0,42	0,66
14	0,3903	5,85	112,54	31,04	3,63	0,03450	24,00	213,26	24,0	9,11	0,022	339445	6,81	49865	2,88	2,81	4,01
15	0,3903	5,85	112,54	31,04	3,63	0,02505	22,00	195,49	24,5	9,00	0,019	314961	7,32	43010	2,88	2,58	3,68
16	0,3903	5,85	112,54	31,04	3,63	0,02011	20,50	182,16	25,5	8,88	0,017	297452	7,62	39057	2,88	2,40	3,43
17	0,3903	5,85	112,54	31,04	3,63	0,01465	16,80	149,29	25,0	8,90	0,019	243218	7,31	33261	2,88	1,97	2,81
18	0,3903	5,85	112,54	31,04	3,63	0,01033	12,70	112,85	25,0	8,90	0,023	183861	6,58	27930	2,88	1,49	2,12
19	0,3903	5,85	112,54	31,04	3,63	0,00500	8,80	78,20	24,0	9,11	0,023	124463	6,56	18983	2,88	1,03	1,47
20	0,3903	5,85	112,54	31,04	3,63	0,00208	5,90	52,43	24,0	9,11	0,022	83447	6,82	12244	2,88	0,69	0,99
21	0,3903	5,85	112,54	31,04	3,63	0,00110	4,00	35,54	24,0	9,11	0,025	56574	6,35	8904	2,88	0,47	0,67
22	0,3903	5,85	112,54	31,04	3,63	0,00055	2,25	19,99	24,0	9,11	0,039	31823	5,05	6296	2,88	0,26	0,38
23	0,3903	7,81	170,35	36,19	4,71	0,03450	43,30	254,19	24,0	9,11	0,020	525307	7,12	73774	4,36	2,90	3,88
24	0,3903	7,81	170,35	36,19	4,71	0,02505	39,00	228,95	24,5	9,00	0,018	478923	7,53	63632	4,36	2,62	3,50
25	0,3903	7,81	170,35	36,19	4,71	0,02011	36,50	214,27	25,5	8,88	0,016	454280	7,86	57784	4,36	2,45	3,27
26	0,3903	7,81	170,35	36,19	4,71	0,01465	29,50	173,18	25,0	8,90	0,018	366332	7,44	49209	4,36	1,98	2,65
27	0,3903	7,81	170,35	36,19	4,71	0,01033	22,80	133,85	25,0	8,90	0,021	283132	6,85	41321	4,36	1,53	2,05
28	0,3903	7,81	170,35	36,19	4,71	0,00500	16,00	93,93	24,0	9,11	0,021	194109	6,91	28085	4,36	1,07	1,44
29	0,3903	7,81	170,35	36,19	4,71	0,00208	10,80	63,40	24,0	9,11	0,019	131023	7,23	18114	4,36	0,72	0,97

Planiha 1 - Dados do Professor Pimenta e Cálculo dos Parâmetros Hidráulicos para Di=39,03cm (continuação)

Teste	Di (m)	Yn (cm)	A (cm ²)	P (cm)	R (cm)	i (m/m)	Qmed (l/s)	V (cm/s)	T (°C)	vx10 ³ (cm/s)	fc 8gRI/V2	Rn 4RV/n	1/(fc) ^{0,5}	Rn(fc) ^{0,5}	Y _D A/D(cm)	Fr V/(gY _n) ^{0,5}	Fr V/(gY _D) ^{0,5}
30	0,3903	7,81	170,35	36,19	4,71	0,00110	7,50	44,03	24,0	9,11	0,021	90988	6,91	13173	4,36	0,50	0,67
31	0,3903	7,81	170,35	36,19	4,71	0,00055	4,20	24,66	24,0	9,11	0,033	50954	5,47	9315	4,36	0,28	0,38
32	0,3903	9,76	233,90	40,87	5,72	0,03450	67,80	289,86	24,0	9,11	0,018	728357	7,36	98911	5,99	2,96	3,78
33	0,3903	9,76	233,90	40,87	5,72	0,02505	61,00	260,79	24,5	9,00	0,017	663316	7,78	85313	5,99	2,67	3,40
34	0,3903	9,76	233,90	40,87	5,72	0,02011	57,00	243,69	25,5	8,88	0,015	628195	8,11	77472	5,99	2,49	3,18
35	0,3903	9,76	233,90	40,87	5,72	0,01465	46,00	196,66	25,0	8,90	0,017	505825	7,67	65975	5,99	2,01	2,56
36	0,3903	9,76	233,90	40,87	5,72	0,01033	35,00	149,63	25,0	8,90	0,021	384867	6,95	55400	5,99	1,53	1,95
37	0,3903	9,76	233,90	40,87	5,72	0,00500	24,80	106,03	24,0	9,11	0,020	266420	7,08	37655	5,99	1,08	1,38
38	0,3903	9,76	233,90	40,87	5,72	0,00208	17,25	73,75	24,0	9,11	0,017	185312	7,63	24287	5,99	0,75	0,96
39	0,3903	9,76	233,90	40,87	5,72	0,00110	12,10	51,73	24,0	9,11	0,018	129987	7,36	17662	5,99	0,53	0,67
40	0,3903	9,76	233,90	40,87	5,72	0,00055	6,75	28,86	24,0	9,11	0,030	72513	5,81	12489	5,99	0,29	0,38
41	0,3903	11,71	301,88	45,25	6,67	0,03450	98,00	324,63	24,0	9,11	0,017	951001	7,64	124508	7,73	3,03	3,73
42	0,3903	11,71	301,88	45,25	6,67	0,02505	89,00	294,82	24,5	9,00	0,015	874220	8,14	107391	7,73	2,75	3,38
43	0,3903	11,71	301,88	45,25	6,67	0,02011	81,00	268,32	25,5	8,88	0,015	806390	8,27	97521	7,73	2,50	3,08
44	0,3903	11,71	301,88	45,25	6,67	0,01465	65,00	215,32	25,0	8,90	0,017	645649	7,77	83049	7,73	2,01	2,47
45	0,3903	11,71	301,88	45,25	6,67	0,01033	50,00	165,63	25,0	8,90	0,020	496653	7,12	69738	7,73	1,55	1,90
46	0,3903	11,71	301,88	45,25	6,67	0,00500	36,00	119,25	24,0	9,11	0,018	349347	7,37	47399	7,73	1,11	1,37
47	0,3903	11,71	301,88	45,25	6,67	0,00208	25,20	83,48	24,0	9,11	0,016	244543	8,00	30572	7,73	0,78	0,96
48	0,3903	11,71	301,88	45,25	6,67	0,00110	17,75	58,80	24,0	9,11	0,017	172248	7,75	22232	7,73	0,55	0,68
49	0,3903	11,71	301,88	45,25	6,67	0,00055	9,90	32,79	24,0	9,11	0,027	96071	6,11	15721	7,73	0,31	0,38
50	0,3903	13,66	373,19	49,42	7,55	0,01465	86,00	230,45	25,0	8,90	0,016	782169	7,82	100014	9,56	1,99	2,38
51	0,3903	13,66	373,19	49,42	7,55	0,01033	65,80	176,32	25,0	8,90	0,020	598450	7,13	83983	9,56	1,52	1,82
52	0,3903	13,66	373,19	49,42	7,55	0,00500	47,10	126,21	24,0	9,11	0,019	418499	7,33	57082	9,56	1,09	1,30
53	0,3903	13,66	373,19	49,42	7,55	0,00208	33,50	89,77	24,0	9,11	0,015	297659	8,08	36817	9,56	0,78	0,93
54	0,3903	13,66	373,19	49,42	7,55	0,00110	23,80	63,77	24,0	9,11	0,016	211471	7,90	26774	9,56	0,55	0,66
55	0,3903	13,66	373,19	49,42	7,55	0,00055	13,25	35,50	24,0	9,11	0,026	117731	6,22	18932	9,56	0,31	0,37
56	0,3903	15,61	446,90	53,45	8,36	0,01033	85,50	191,32	24,0	9,11	0,019	702371	7,35	95583	11,45	1,55	1,81
57	0,3903	15,61	446,90	53,45	8,36	0,00500	61,80	138,29	24,0	9,11	0,017	507679	7,63	66499	11,45	1,12	1,30

Planiha 1 - Dados do Professor Pimenta e Cálculo dos Parâmetros Hidráulicos para Di=39,03cm (continuação)

Teste	Di (m)	Yn (cm)	A (cm ²)	P (cm)	R (cm)	i (m/m)	Qmed (l/s)	V (cm/s)	T (°C)	vx10 ³ (cm/s)	fc 8gRi/V2	Rn 4RV/n	1/(fc) ^{0,5}	Rn(fc) ^{0,5}	Y _D A/D(cm)	Fr V/(gY _n) ^{0,5}	Fr V/(gY _D) ^{0,5}
58	0,3903	15,61	446,90	53,45	8,36	0,00208	44,30	99,13	24,0	9,11	0,014	363919	8,48	42890	11,45	0,80	0,94
59	0,3903	15,61	446,90	53,45	8,36	0,00110	31,50	70,49	24,0	9,11	0,015	258768	8,30	31191	11,45	0,57	0,67
60	0,3903	17,56	522,17	57,40	9,10	0,00500	77,50	148,42	24,0	9,11	0,016	592846	7,86	75471	13,38	1,13	1,30
61	0,3903	17,56	522,17	57,40	9,10	0,00208	56,00	107,24	24,0	9,11	0,013	428379	8,80	48677	13,38	0,82	0,94
62	0,3903	17,56	522,17	57,40	9,10	0,00110	40,00	76,60	24,0	9,11	0,013	305985	8,64	35399	13,38	0,58	0,67
63	0,3903	19,52	598,21	61,31	9,76	0,00500	96,00	160,48	24,0	9,11	0,015	687534	8,20	83833	15,33	1,16	1,31
64	0,3903	19,52	598,21	61,31	9,76	0,00208	69,50	116,18	24,0	9,11	0,012	497746	9,21	54071	15,33	0,84	0,95
65	0,3903	19,52	598,21	61,31	9,76	0,00110	49,50	82,75	24,0	9,11	0,012	354510	9,02	39321	15,33	0,60	0,67

Planiha 2 - Dados de Apelt & Kazemipour e Cálculo dos Parâmetros Hidráulicos.

Teste	D (m)	Yn (cm)	A (cm ²)	P (cm)	R (cm)	i (m/m)	Qmed (l/s)	V (cm/s)	T (°C)	v x 10 ³ (cm/s)	fc 8gRi/V ²	Rn 4RV/n	1/(fc) ^{u,b}	Rn(fc) ^{u,b}	Y _D A/D(cm)	Fr VI/(gY _n) ^{0,5}	Fr VI/(gY _D) ^{0,5}
1A	0,380	8,92	202,83	38,44	5,28	0,00052	5,94	29,29	25,0	8,90	0,0249	69450	6,34	10952	5,34	0,31	0,40
1B	0,380	8,95	203,80	38,51	5,29	0,00052	6,09	29,88	26,2	8,66	0,0240	73043	6,46	11305	5,36	0,32	0,41
2A	0,380	9,81	231,98	40,51	5,73	0,00052	7,32	31,55	24,7	8,96	0,0232	80677	6,56	12301	6,10	0,32	0,41
2B	0,380	10,26	247,05	41,53	5,95	0,00052	7,95	32,18	24,0	9,11	0,0232	84059	6,56	12809	6,50	0,32	0,40
2C	0,380	10,48	254,50	42,02	6,06	0,00052	8,42	33,08	24,8	8,95	0,0224	89555	6,69	13393	6,70	0,33	0,41
3A	0,380	11,36	284,76	43,97	6,48	0,00052	9,60	33,71	25,0	8,90	0,0230	98137	6,59	14894	7,49	0,32	0,39
3B	0,380	11,87	302,62	45,07	6,71	0,00052	10,62	35,09	26,0	8,70	0,0220	108331	6,74	16081	7,96	0,33	0,40
4	0,380	12,53	326,04	46,49	7,01	0,00052	11,75	36,04	26,2	8,66	0,0218	116750	6,77	17248	8,58	0,33	0,39
5A	0,380	12,84	337,15	47,14	7,15	0,00052	12,48	37,02	24,0	9,11	0,0211	116234	6,89	16882	8,87	0,33	0,40
5B	0,380	12,80	335,71	47,06	7,13	0,00052	12,49	37,20	25,0	8,90	0,0208	119286	6,93	17216	8,83	0,33	0,40
6	0,380	13,86	374,15	49,28	7,59	0,00052	14,05	37,55	25,0	8,90	0,0218	128136	6,78	18902	9,85	0,32	0,38
7	0,380	14,00	379,27	49,57	7,65	0,00052	14,72	38,81	23,3	9,25	0,0205	128410	6,98	18399	9,98	0,33	0,39
8	0,380	14,93	413,59	51,49	8,03	0,00052	16,00	38,69	23,4	9,23	0,0217	134674	6,79	19836	10,88	0,32	0,37
9	0,380	15,31	427,72	52,26	8,18	0,00052	16,98	39,70	23,5	9,20	0,0210	141259	6,90	20465	11,26	0,32	0,38
10	0,380	16,06	455,78	53,79	8,47	0,00052	18,60	40,81	23,5	9,20	0,0206	150353	6,97	21562	11,99	0,33	0,38
11	0,380	7,33	153,32	34,56	4,44	0,00104	6,06	39,52	22,8	9,37	0,0232	74860	6,57	11397	4,03	0,47	0,63
12	0,380	8,55	191,00	37,56	5,09	0,00104	8,02	41,99	23,0	9,33	0,0235	91542	6,52	14045	5,03	0,46	0,60
13	0,380	9,40	218,44	39,56	5,52	0,00104	10,00	45,78	23,1	9,30	0,0215	108717	6,82	15942	5,75	0,48	0,61
14	0,380	10,31	248,74	41,64	5,97	0,00104	11,95	48,04	33,6	9,41	0,0211	121994	6,88	17731	6,55	0,48	0,60
15	0,380	11,14	277,13	43,48	6,37	0,00104	13,93	50,27	22,8	9,37	0,0206	136757	6,97	19623	7,29	0,48	0,59
16	0,380	12,14	312,16	45,65	6,84	0,00104	16,11	51,61	23,0	9,33	0,0210	151287	6,91	21899	8,21	0,47	0,57
17	0,380	12,83	336,79	47,12	7,15	0,00104	18,20	54,04	22,6	9,41	0,0200	164178	7,08	23204	8,86	0,48	0,58
18	0,380	13,42	358,11	48,36	7,40	0,00104	20,00	55,85	23,0	9,33	0,0194	177293	7,18	24679	9,42	0,49	0,58
19	0,380	14,08	382,21	49,74	7,68	0,00104	21,97	57,48	24,5	9,00	0,0190	196322	7,26	27049	10,06	0,49	0,58
20	0,380	14,73	406,17	51,08	7,95	0,00104	23,83	58,67	24,7	8,96	0,0189	208283	7,28	28601	10,69	0,49	0,57
21	0,380	15,52	435,56	52,69	8,27	0,00104	26,10	59,92	25,5	8,80	0,0188	225156	7,30	30863	11,46	0,49	0,57
22	0,380	16,00	453,53	53,67	8,45	0,00104	27,57	60,79	24,2	9,07	0,0187	226568	7,32	30955	11,94	0,49	0,56

Planiha 2 - Dados de Apelt & Kazemipour e Cálculo dos Parâmetros Hidráulicos (continuação).

Teste	D (m)	Yn (cm)	A (cm ²)	P (cm)	R (cm)	i (m/m)	Qmed (l/s)	V (cm/s)	T (°C)	v x 10 ³ (cm/s)	fc 8gRi/V ²	Rn 4RV/n	1/(fc) ^{0,5}	Rn(fc) ^{0,5}	Y _D A/D(cm)	Fr V/(gY _n) ^{0,5}	Fr V/(gY _D) ^{0,5}
23	0,380	6,20	120,48	31,60	3,81	0,00149	5,18	42,99	25,3	8,86	0,0241	74003	6,44	11493	3,17	0,55	0,77
24	0,380	7,58	160,87	35,19	4,57	0,00149	7,92	49,23	23,7	9,17	0,0221	98182	6,73	14581	4,23	0,57	0,76
25	0,380	8,84	200,26	38,25	5,24	0,00149	10,92	54,53	24,0	9,11	0,0206	125350	6,97	17986	5,27	0,59	0,76
26	0,380	10,00	238,32	40,94	5,82	0,00149	14,00	58,75	24,2	9,07	0,0197	150817	7,12	21182	6,27	0,59	0,75
27	0,380	10,90	268,85	42,95	6,26	0,00149	16,20	60,26	24,4	9,02	0,0202	167248	7,04	23746	7,08	0,58	0,72
28	0,380	11,90	303,68	45,14	6,73	0,00149	19,28	63,49	24,5	9,00	0,0195	189841	7,16	26522	7,99	0,59	0,72
29	0,380	12,81	336,07	47,08	7,14	0,00149	22,00	65,46	24,6	8,98	0,0195	208146	7,17	29050	8,84	0,58	0,70
30	0,380	13,47	359,92	48,47	7,43	0,00149	24,50	68,07	24,6	8,98	0,0187	225163	7,30	30824	9,47	0,59	0,71
31	0,380	14,45	395,82	50,50	7,84	0,00149	28,00	70,74	24,5	9,00	0,0183	246420	7,39	33350	10,42	0,59	0,70
32	0,380	15,48	434,07	52,61	8,25	0,00149	32,18	74,14	24,5	9,00	0,0176	271857	7,55	36019	11,42	0,60	0,70
33	0,380	16,11	457,66	53,89	8,49	0,00149	34,30	74,95	24,5	9,00	0,0177	282893	7,52	37616	12,04	0,60	0,69
34	0,380	6,03	115,74	31,14	3,72	0,00205	5,94	51,32	22,8	9,37	0,0227	81434	6,64	12269	3,05	0,67	0,94
35	0,380	7,77	166,66	35,66	4,67	0,00205	9,90	59,40	22,7	9,39	0,0213	118261	6,85	17264	4,39	0,68	0,91
36	0,380	9,20	211,90	39,10	5,42	0,00205	14,00	66,07	22,8	9,37	0,0200	152864	7,08	21605	5,58	0,70	0,89
37	0,380	10,51	255,52	42,09	6,07	0,00205	17,88	69,97	22,8	9,37	0,0199	181357	7,08	25615	6,72	0,69	0,86
38	0,380	11,75	298,40	44,81	6,66	0,00205	22,21	74,43	22,9	9,35	0,0193	212027	7,19	29484	7,85	0,69	0,85
39	0,380	12,80	335,71	47,06	7,13	0,00205	26,07	77,66	22,8	9,37	0,0190	236494	7,25	32625	8,83	0,69	0,83
40	0,380	13,64	366,11	48,82	7,50	0,00205	30,00	81,94	22,8	9,37	0,0180	262313	7,46	35161	9,63	0,71	0,84
41	0,380	14,80	408,77	51,22	7,98	0,00205	34,87	85,31	22,1	9,53	0,0176	285744	7,53	37955	10,76	0,71	0,83
42	0,380	15,92	450,53	53,50	8,42	0,00205	40,00	88,78	22,1	9,53	0,0172	313797	7,63	41138	11,86	0,71	0,82
43	0,380	5,6	103,97	29,94	3,47	0,00305	6,21	59,73	22,9	9,35	0,0233	88722	6,55	13542	2,74	0,81	1,15
44	0,380	7,14	147,65	34,07	4,33	0,00305	10,19	69,01	23,2	9,28	0,0218	128904	6,78	19023	3,89	0,82	1,12
45	0,380	8,55	191,00	37,56	5,09	0,00305	14,88	77,90	24,1	9,08	0,0201	174521	7,06	24715	5,03	0,85	1,11
46	0,380	9,72	228,99	40,30	5,68	0,00305	19,45	84,94	24,0	9,11	0,0189	211914	7,28	29096	6,03	0,87	1,10
47	0,380	10,68	261,31	42,47	6,15	0,00305	23,49	89,89	24,2	9,07	0,0182	243943	7,41	32935	6,88	0,88	1,09
48	0,380	11,8	300,15	44,92	6,68	0,00305	28,50	94,95	24,5	9,00	0,0177	281975	7,51	37557	7,90	0,88	1,08
49	0,380	12,76	334,27	46,97	7,12	0,00305	33,45	100,07	24,7	8,96	0,0170	317898	7,67	41461	8,80	0,89	1,08
50	0,380	13,67	367,21	48,89	7,51	0,00305	37,99	103,46	25,0	8,90	0,0168	349270	7,72	45269	9,66	0,89	1,06

Planiha 2 - Dados de Apelt & Kazemipour e Cálculo dos Parâmetros Hidráulicos (continuação).

Teste	D (m)	Yn (cm)	A (cm ²)	P (cm)	R (cm)	i (m/m)	Qmed (l/s)	V (cm/s)	T (°C)	v x 10 ³ (cm/s)	fc 8gRi/V ²	Rn 4RV/n	1/(fc) ^{0,5}	Rn(fc) ^{0,5}	Y _D A/D(cm)	Fr V/(gY _n) ^{0,5}	Fr V/(gY _D) ^{0,5}
51	0,380	14,55	399,52	50,71	7,88	0,00305	42,99	107,61	25,0	8,90	0,0163	381040	7,84	48630	10,51	0,90	1,06
52	0,380	5,00	88,18	28,21	3,13	0,00403	5,84	66,23	26,5	8,60	0,0225	96283	6,66	14454	2,32	0,95	1,39
53	0,380	7,08	145,87	33,92	4,30	0,00403	11,92	81,71	26,4	8,62	0,0204	163070	7,01	23274	3,84	0,98	1,33
54	0,380	8,50	189,42	37,44	5,06	0,00403	17,5	92,39	26,6	8,58	0,0187	217906	7,30	29835	4,98	1,01	1,32
55	0,380	9,83	232,64	40,55	5,74	0,00403	23,49	100,97	26,8	8,55	0,0178	271002	7,50	36154	6,12	1,03	1,30
56	0,380	10,90	268,85	42,95	6,26	0,00403	28,99	107,83	27,0	8,51	0,0170	317227	7,66	41393	7,08	1,04	1,29
57	0,380	11,82	300,86	44,96	6,69	0,00403	34,00	113,01	25,5	8,80	0,0166	343706	7,77	44243	7,92	1,05	1,28
58	0,380	12,85	337,50	47,16	7,16	0,00403	40,00	118,52	25,8	8,75	0,0161	387699	7,88	49213	8,88	1,06	1,27
59	0,380	13,93	376,71	49,43	7,62	0,00403	46,90	124,50	25,9	8,72	0,0156	435273	8,02	54282	9,91	1,07	1,26
60	0,380	3,90	61,32	24,78	2,47	0,00507	3,97	64,75	24,9	8,92	0,0235	71830	6,53	11007	1,61	1,05	1,63
61	0,380	4,60	78,08	27,01	2,89	0,00507	5,59	71,59	24,8	8,94	0,0224	92609	6,68	13873	2,05	1,07	1,59
62	0,380	6,55	130,42	32,54	4,01	0,00507	11,60	88,94	25,0	8,90	0,0202	160227	7,04	22750	3,43	1,11	1,53
63	0,380	7,97	172,82	36,15	4,78	0,00507	17,40	100,68	25,2	8,87	0,0188	217035	7,30	29729	4,55	1,14	1,51
64	0,380	9,09	208,33	38,84	5,36	0,00507	22,98	110,31	25,2	8,87	0,0175	266816	7,55	35337	5,48	1,17	1,50
65	0,380	10,32	249,08	41,66	5,98	0,00507	29,50	118,44	26,0	8,70	0,0170	325558	7,68	42396	6,55	1,18	1,48
66	0,380	11,13	276,78	43,46	6,37	0,00507	34,45	124,47	26,0	8,70	0,0164	364440	7,82	46610	7,28	1,19	1,47
67	0,380	12,40	321,40	46,21	6,96	0,00507	42,50	132,24	26,1	8,68	0,0158	423838	7,95	53320	8,46	1,20	1,45
68	0,380	13,11	346,88	47,71	7,27	0,00507	47,90	138,09	26,2	8,66	0,0152	463705	8,12	57113	9,13	1,22	1,46
69	0,380	3,62	54,96	23,85	2,30	0,00604	3,78	68,77	26,5	8,60	0,0231	73727	6,58	11206	1,45	1,15	1,83
70	0,380	6,07	116,85	31,25	3,74	0,00604	11,16	95,51	26,5	8,60	0,0194	166113	7,17	23156	3,07	1,24	1,74
71	0,380	7,50	158,44	34,99	4,53	0,00604	17,14	108,18	26,4	8,62	0,0183	227333	7,38	30789	4,17	1,26	1,69
72	0,380	8,93	203,16	38,46	5,28	0,00604	24,25	119,37	24,9	8,92	0,0176	282721	7,54	37477	5,35	1,28	1,65
73	0,380	10,40	251,79	41,84	6,02	0,00604	33,06	131,30	25	8,90	0,0165	355115	7,77	45679	6,63	1,30	1,63
74	0,380	11,68	295,94	44,66	6,63	0,00604	41,96	141,79	25,2	8,87	0,0156	423680	8,00	52959	7,79	1,32	1,62
75	0,380	12,72	332,84	46,89	7,10	0,00604	49,52	148,78	25,3	8,86	0,0152	476794	8,11	58784	8,76	1,33	1,61