



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
– MESTRADO –**

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O USO DA FORMULAÇÃO  
TRANSFORMADA DE COLEBROOK-WHITE EM CANAIS  
CIRCULARES E NATURAIS EM ESCOAMENTO UNIFORME**

*Por*

*Ícaro de França Albuquerque*

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Mestre*

**João Pessoa – Paraíba**

**Setembro de 2017**



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
– MESTRADO –**

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O USO DA FORMULAÇÃO  
TRANSFORMADA DE COLEBROOK WHITE EM CANAIS  
CIRCULARES E NATURAIS EM ESCOAMENTO UNIFORME**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

**Ícaro de França Albuquerque**

**Orientador: Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva**

**João Pessoa – Paraíba**

**Setembro de 2017**

A345i Albuquerque, Ícaro de França.

Investigação sobre o uso da formulação transformada de Colebrook White em canais circulares e naturais em escoamento uniforme / Ícaro de França Albuquerque. - João Pessoa, 2017.

79 f. : il.

Orientação: Tarciso Cabral da Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia civil e ambiental. 2. Escoamento uniforme. 3. Canais circulares. 4. Canais naturais. I. Silva, Tarciso Cabral da. II. Título.

UFPB/BC

**“INVESTIGAÇÃO SOBRE O USO DA FORMULAÇÃO TRANSFORMADA DE  
COLEBROOK WHITE EM CANAIS CIRCULARES E NATURAIS EM ESCOAMENTO  
UNIFORME”**

**ÍCARO DE FRANÇA ALBUQUERQUE**

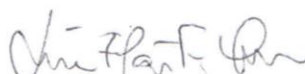
**Dissertação aprovada em 29 de setembro de 2017  
Período Letivo: 2017.2**



**Prof. Dr. TARCISO CABRAL DA SILVA - UFPB  
(Orientador)**



**Prof. Dr. CELSO AUGUSTO GUIMARÃES SANTOS - UFPB  
(Membro Interno)**



**Prof. Dr. LUCIO FLAVIO FERREIRA MOREIRA – UFRN  
(Membro Externo)**

**João Pessoa/PB  
2017**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço este trabalho, primeiramente a minha mãe Maria Emília de França Albuquerque, que hoje não se encontra entre nós, porém foi que me ensinou e ensina até os dias atuais a ser quem eu sou e seguir em frente.

Agradeço a minha família, em especial ao meu pai, Sérgio Ricardo Costa de Albuquerque e meus irmãos Iasmin de França Albuquerque e Ian de França Albuquerque e minha tia Arcuris de França, pois, sem o apoio, ajuda e a simples presença deles em minha vida, eu nada seria e nada teria alcançado.

Ao Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva pela orientação e todo o conhecimento por ele me repassado, assim como pela sua dedicação e paciência ao me instruir desde que fui aluno de iniciação científica, assim sendo sempre meu pilar de sustentação dentro de toda a minha carreira acadêmica.

Aos professores Nelson Oswaldo Luna Caicedo, Hamilcar José Almeida Filgueira, Celso Augusto Guimarães Santos, Carmem Lucia Moreira Gadelha e Cristiano das Neves Almeida em nome de todos do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECAAM por todo o conhecimento adquirido ao longo do curso.

Aos amigos Samara Fernandes, Marie Eugénie, Samir Fernandes, Lucila Araújo e Geraldo Moura em nome de todos que estiveram presentes durante toda esta caminhada, e pela convivência e companheirismo em diversos trabalhos ao longo das disciplinas.

Um agradecimento em especial aos amigos Alex Black, Akira Duarte, Diego Ferreira, Natália Lins, Leonardo Vinicius, Pablo Ramos e Rafael Carneiro, Talles de Macedo, que fizeram dos dias acadêmicos os mais inesquecíveis.

## RESUMO

São bastante conhecidos os bons resultados da aplicação de expressões para o cálculo de escoamento permanente de água em tubos pressurizados, como a expressão de Colebrook-White. No entanto, essa expressão não produz, em canais abertos, resultados que possam ser julgados como adequados para aplicações práticas. As correntes de circulação e a presença de superfície livre, dependentes da forma da seção transversal do canal, são os fatores atribuídos à não adequação das formulações de tubos circulares fechados para o escoamento uniforme em canais. Por essas razões, metodologias que tentam corrigir os efeitos adicionais das perdas de energia no escoamento uniforme em canais têm sido desenvolvidas nas últimas décadas, com resultados bastante animadores. Dentre essas metodologias é destacada nessa dissertação a formulação para cálculo do escoamento uniforme em canais, denominada AC-W, que considera os efeitos de forma na resistência ao escoamento, com uso da equação de Colebrook-White. A aplicação da formulação AC-W, para o cálculo da vazão em condições de escoamento uniforme em canais de seções prismáticas, lisos e rugosos, tem produzido resultados melhores do que os derivados da conhecida equação de Manning. Nesse trabalho, são feitas aplicações das formulações AC-W e de Manning para o cálculo da vazão em canais circulares lisos e rugosos e de canais naturais, em escoamento uniforme, a partir de dados experimentais obtidos na literatura. São feitas comparações entre essas formulações com base na análise dos resultados produzidos. Como forma de avaliar o desempenho das formulações, a comparação dos resultados calculados com os observados é feita, utilizando-se o critério do menor erro absoluto relativo médio (MARE), além de outros indicadores. A equação AC-W mostrou-se mais eficiente para todas as aplicações feitas, tendo atingido apenas 28,1% do MARE obtido com a aplicação da fórmula de Manning para os canais naturais e 50,4% para os canais circulares.

**PALAVRAS-CHAVE:** escoamento uniforme, canais circulares, canais naturais.

## ABSTRACT

The results of the expression for the calculation of permanent flow of water in pressurized tubes, such as Colebrook-White's expression, are very well-known for its good quality. However, this expression does not produce, in open channels, accurate results that could be judged as suitable for practical applications. The secondary currents and the presence of the free surface, that are linked to the transversal shape of the channels, are the factors attributed to the non-adequacy of pressurized tubes formulations to uniform flow in channels. For these reasons, methodologies that attempt to correct the additional effects of energy losses on uniform channel flow have been developed in recent decades and there were very encouraging results. Among these methodologies, it is highlighted in this dissertation, the formulation for calculation of the uniform flow in channels, which take into account the shape effects of the channels on the resistance to the flow, using applying the Colebrook-White equation. The application of the AC-W formulation for the calculation of the flow in channels in uniform flow in channels of prismatic sections, smooth and rough, has produced better results than the well-known Manning equation. In this work, the applications of the AC-W and Manning formulation for the flow calculation in smooth and rough circular channels and natural channels, in uniform flow, to experimental data obtained in the literature are carried out. Comparisons are made between these formulations based on the analysis of the results produced. As a way to verify the performance of the formulations, the calculated results are compared with those observed, using the criterion of the lowest absolute relative mean error (MARE) beside other indicators. The AC-W equation was more efficient for all applications, reaching only 28.1% of the MARE obtained with the Manning formula to the natural channels and 50.4% to the circular channels.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	17
<b>2.1 Objetivo geral</b> .....	17
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	17
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	18
<b>3.1 Escoamento uniforme em Canais</b> .....	18
<b>3.2 Explicação da expressão AC-W</b> .....	20
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	26
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	29
<b>5.1 Dados utilizados</b> .....	29
5.1.1 CANAIS CIRCULARES LISOS E RUGOSOS .....	29
5.1.2 CANAIS NATURAIS .....	30
<b>5.2 Cálculos preliminares e análise de consistência</b> .....	32
<b>5.3 Aplicações das equações AC-W e de Manning para canais circulares lisos e rugosos</b> .....	33
5.3.1 CANAIS EM CONCRETO .....	34
5.3.3 CANAIS DE PVC .....	41
5.3.4 CANAIS DE CIMENTO AMIANTO .....	43
<b>5.4 Calibração dos coeficientes de rugosidade <math>n</math> e <math>k_s</math> para canais circulares</b> .....	46
5.4.1 CONCRETO .....	47
5.4.2 CERÂMICA .....	48
5.4.3 PVC .....	50
5.4.4 CIMENTO AMIANTO .....	51
<b>5.5 Aplicações das equações AC-W e de Manning para Canais Naturais</b> .....	54
<b>5.6 Calibração dos coeficientes de rugosidade <math>n</math> e <math>k_s</math> para canais naturais</b> .....	57
<b>5.7 Relações obtidas como os coeficientes de rugosidade calibrados</b> .....	61
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	64
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	66
<b>ANEXO A</b> .....	69

<b>Dados utilizados para o cálculo e comparação das vazões utilizando as equações de Manning e AC-W extraídos da dissertação de Steven F. Mangin (MANGIN, 2010) para canais circulares. ....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>80</b>
<b>Dados utilizados para o cálculo e comparação das vazões para canais naturais, utilizando as equações de Manning e AC-W, dados extraídos no livro Open-Chanel Hydraulics, apresentados por French (1985).....</b>	<b>80</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva do segundo parâmetro $\psi_2$ do método de Kazemipour em função da razão de aspecto $B/y_m$ .....	21
Figura 2 - Fluxograma metodológico da pesquisa .....	26
Figura 3 - Dados de escoamento uniforme do rio Indian Fork, 11 de maio de 1948 .....	31
Figura 4 - Vazões observadas e calculadas para os canais em concreto. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning $Q_M$ versus $Q_{obs}$ com $n$ do fabricante igual a 0,011; b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W $Q_{AC-W}$ versus $Q_{obs}$ com $k_s$ indicados pelos pesquisadores, igual a 0,017 m.....	35
Figura 5 - Vazões adimensionalizadas calculadas pela AC-W e equação de Manning versus $y/D$ para canal do tipo concreto.....	36
Figura 6 - Vazões observadas e calculadas para os canais em cerâmica. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning $Q_M$ versus $Q_{obs}$ com $n$ do fabricante igual a 0,011; b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W $Q_{AC-W}$ versus $Q_{obs}$ com $k_s$ indicados pelos pesquisadores igual a 0,00015m.....	37
Figura 7 - Vazões adimensionalizadas calculadas pela AC-W e equação de Manning versus $y/D$ para canal em cerâmica com coeficiente de Manning igual a 0,011 .....	38
Figura 8 - Vazões observadas e calculadas para os canais em cerâmica. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning $Q_M$ versus $Q_{obs}$ com $n$ do fabricante igual a 0,013; b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W $Q_{AC-W}$ versus $Q_{obs}$ com $k_s$ indicados pelos pesquisadores, igual a 0,00015m.....	39
Figura 9- Vazões adimensionalizadas calculadas pela AC-W e equação de Manning versus $y/D$ para canal em cerâmica com coeficiente de Manning igual a 0,013 .....	40
Figura 10 - Vazões observadas e calculadas para os canais em PVC. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning $Q_{cal}$ versus $Q_{obs}$ com $n$ do fabricante igual a 0,012; b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W $Q_{cal}$ versus $Q_{obs}$ com $k_s$ indicados pelos pesquisadores igual a 0,00015m.....	42
Figura 11 - Vazões adimensionalizadas calculadas pela AC-W e equação de Manning versus $y/D$ para canal em PVC.....	43
Figura 12 - Vazões observadas e calculadas para os canais em cimento amianto. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning $Q_M$ versus $Q_{obs}$ com $n$ do fabricante igual a 0,012; b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W $Q_{AC-W}$ versus $Q_{obs}$ com $k_s$ indicados pelos pesquisadores igual a 0,00015m.....	44
Figura 13 - Vazões adimensionalizadas calculadas pela AC-W e equação de Manning versus $y/D$ para canal em cimento amianto .....	45
Figura 14- MARE produzido para cada equação por material do canal circular .....	46
Figura 15 - Curva MARE x $n$ (Manning) para canal circular de concreto.....	47

Figura 16 – Curva MARE x coeficiente de rugosidade $k_s$ (m) para os canais circulares em concreto.....	48
Figura 17 - Curva MARE x n (Manning) para canal circular de cerâmica.....	48
Figura 18 - Curva MARE x coeficiente de rugosidade $k_s$ para os canais circulares de cerâmica.....	49
Figura 19 - Curva MARE x n (Manning) para canal circular de cerâmica.....	49
Figura 20 - Curva MARE x coeficiente de rugosidade $k_s$ (m) para os canais circulares de cerâmica com n inicial iguala a 0,013.....	50
Figura 21 - Curva MARE x n (Manning) para canal circular de PVC.....	50
Figura 22 - Curva MARE x coeficiente de rugosidade $k_s$ (m) para os canais circulares de PVC.....	51
Figura 23 - Curva MARE x n (Manning) para canal circular de Cimento Amianto.....	51
Figura 24 - Curva MARE x coeficiente de rugosidade $k_s$ (m) para os canais circulares de Cimento Amianto.....	52
Figura 25 - MARE produzido pelas equações com parâmetros de rugosidade calibrados por tipo de material do canal circular.....	53
Figura 26 – Curva de distribuição da frequência para os valores de $f_c/f$ analisados.....	54
Figura 27 - Vazões observadas e calculadas para os canais naturais. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning $Q_M$ versus $Q_{obs}$ com n de French (1985); b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W $Q_{AC-W}$ versus $Q_{obs}$ com $k_s$ (m) calculado por Strickler.....	55
Figura 28 - Comparação dos erros para cada equação referentes a cada n de Manning.....	56
Figura 29 - Comparação dos erros calculados para cada valor de n antes e após calibração.....	58
Figura 30 - Variação do erro para cada coeficiente de rugosidade $k_s$ em metros após calibração.....	59
Figura 31 - Vazões observadas e calculadas para os canais naturais com coeficientes de rugosidade calibrados. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning $Q_{cal}$ versus $Q_{obs}$ b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W $Q_{cal}$ versus $Q_{obs}$ .....	60
Figura 32 - Relação dos coeficientes de rugosidade para o número n de Manning calibrado e calculado pela Equação 19.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pesquisadores e tipo de material do canal circular.....	29
Tabela 2 - Coeficientes de rugosidades $n$ e $k_s$ .....	29
Tabela 3 - Descrição dos dados experimentais utilizados para canais circulares.....	30
Tabela 4 - Descrição dos dados experimentais utilizados para canais naturais.....	32
Tabela 5 – Valores de MARE para canais circulares .....	45
Tabela 6 - Valores calibrados dos coeficientes de rugosidade para os canais analisados .....	52
Tabela 7 - Erro absoluto relativo médio utilizando os coeficientes de rugosidade calibrados para canais circulares .....	53
Tabela 8 - Valores do MARE para as vazões com os coeficientes $n$ de Manning apresentados por French e $k_s$ calculados por Strickler.....	56
Tabela 9 - Coeficientes de Manning calibrados e MARE.....	57
Tabela 10 - Coeficientes de rugosidade $k_s$ segundo Strickler e calibrados .....	59
Tabela 11 – Valores do MARE para as vazões com os coeficientes de rugosidade calibrados.....	61
Tabela 12 - Erros resultantes .....	62

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f_c$  - Fator de atrito para canais abertos

$f$  - é o fator de atrito para tubos pressurizado

$\psi$  - Parâmetro de forma do método de Kazemipour

$\psi_1$  - Primeiro parâmetro de forma do método de Kazemipour

$\psi_2$  - Segundo parâmetro de forma do método de Kazemipour

$P$  - é o perímetro molhado da seção transversal do escoamento

$B$  - largura de topo do escoamento no canal

$y_m$  - Profundidade efetiva do escoamento

$y$  - Profundidade máxima do escoamento no canal

$A$  - área da seção transversal do escoamento

$\psi_t$  - Parâmetro de forma apresentado por Cabral da Silva (2003)

$\tau(p)$  - Função que representa a distribuição da tensão de cisalhamento ao longo do perímetro molhado

$p$  - Variável independente de posição ou distância ( $P \geq p \geq 0$ )

$\tau_o$  - é a tensão de cisalhamento média

$\rho$  - Massa específica da água

$g$  - Aceleração da gravidade

$R$  - Raio hidráulico do escoamento

$S$  - Declividade do fundo do canal

$y/D$  - profundidade relativa para seções circulares

$J$  - Perda de carga por unidade de comprimento

$V$  - Velocidade média do escoamento na tubulação

$S$  - Declividade

$V_c$  - Velocidade média do escoamento no canal

$D$  - Diâmetro do conduto

$L$  - Comprimento

$k_s$  - Rugosidade absoluta do material do conduto ou canal

$R_e$  - Número de Reynolds

$hf$  - Perda de carga

$S_f$  - Perda de carga por unidade de comprimento

$D_{equiv}$  - Diâmetro equivalente

$Q_c$  - Vazão volumétrica escoada no canal

$Q_{cal}$  - Vazão calculada

$Q_{obs}$  - Vazão observada

$Q_M$  - Vazões calculadas usando a fórmula de Manning

$Q_{AC-W}$  - Vazões calculadas usando a fórmula AC-W

$m$  - Quantidade de vazões calculadas

$n$  - Coeficiente de rugosidade de Manning

MARE - Erro Absoluto Relativo Médio

## 1. INTRODUÇÃO

O uso cada vez mais intenso da água e a sua conseqüente valorização tem levado os pesquisadores a buscar melhores metodologias para avaliação dos recursos hídricos. Nesse sentido, a hidráulica, como ciência, tem dado importantes contribuições por meio por meio da pesquisa e conseqüente conhecimento da influência de diversas variáveis a fenômenos relativos à estática e à dinâmica da água, fazendo uso, com frequência, de experimentos de laboratório como um apoio direto e indispensável para a verificação da validade das metodologias e dos modelos matemáticos que são desenvolvidos.

Neste contexto, são bastante conhecidos na engenharia hidráulica os bons resultados da aplicação de expressões para o cálculo de escoamento permanente da água em tubos pressurizados, como os obtidos com o uso da expressão de Colebrook-White. A equação de Colebrook-White é considerada como a mais precisa lei de resistência ao escoamento em tubos e tem sido usada como um padrão de referência (DINIZ, SOUZA e MORAES, 2011). No entanto, quando a abordagem é em canais abertos, essa expressão não produz resultados precisos que possam ser considerados como adequados para aplicações práticas (CABRAL DA SILVA & LIMA, 2017).

A não adequação das formulações de tubos circulares fechados para cálculos em escoamento uniforme em canais é justificada, pois, este tipo de escoamento não leva em consideração a não uniformidade da distribuição da tensão de cisalhamento, com o conseqüente aparecimento de correntes transversais de circulação, e a superfície livre existente (NGUYEN & CHENG, 2012). A consideração do escoamento uniforme em canais, como se fosse um tubo equivalente de diâmetro igual a quatro vezes o raio hidráulico, sem levar em conta os efeitos da forma assimétrica da seção transversal, não se mostra adequada (MONTES, 1998; CHENG et al., 2011).

Por essas razões, metodologias que tentam corrigir os efeitos adicionais das perdas de energia conhecidos como efeitos de forma, devido às correntes de circulação no escoamento uniforme em canais, têm sido desenvolvidas ultimamente com resultados bastante animadores (GOLDFARB & CABRAL DA SILVA, 2007; CHENG et al., 2011).

Dentre essas metodologias, é destacada nessa comunicação a formulação desenvolvida por Lima (2013), denominada AC-W, para cálculo da vazão do escoamento uniforme em canais, considerando os efeitos de forma na resistência ao escoamento e fazendo uso da equação de Colebrook-White (C-W), da equação universal de perdas de carga ou de Darcy-Wesibach e a equação de Kazemipour para correção do fator de atrito  $f$ , conforme formato deduzido para escoamento uniforme em canais.

A equação AC-W tem produzido melhores resultados do que os obtidos com a conhecida equação de Manning, com vantagens adicionais como, por exemplo, a possibilidade de consideração da influência da viscosidade da água (GOLDFARB & CABRAL DA SILVA, 2007; CABRAL DA SILVA & LIMA, 2017). Esta afirmação também é corroborada no trabalho de Cabral de Silva et al. (2015), onde é concluído que para calcular o fluxo uniforme em canais hidraulicamente lisos e rugosos em seção triangular e retangular, esta nova formulação se mostra mais eficiente.

Apesar dos trabalhos realizados anteriormente demonstrar a qualidade superior da formulação AC-W em relação ao escoamento em canais prismáticos, com dados obtidos em laboratório, não havia até o presente trabalho, avaliação dessa formulação para o escoamento uniforme em canais naturais e em canais circulares rugosos.

Nesse sentido, o presente estudo visa avaliar o desempenho da expressão AC-W em canais circulares hidraulicamente lisos e rugosos, e também em canais naturais com escoamento uniforme.

A hipótese que se define para esse trabalho é que a formulação AC-W apresenta valores de vazões calculadas que se coadunam mais com os dos dados experimentais de escoamento uniforme em canais circulares lisos e rugosos e em canais naturais, em relação aos obtidos por meio da aplicação da equação de Manning.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Aplicar a equação modificada de Colebrook-White (AC-W) a dados experimentais do escoamento uniforme em canais circulares hidraulicamente lisos e rugosos e em canais naturais, comparando os resultados obtidos com os advindos da fórmula de Manning.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Verificar a adequabilidade da formulação AC-W para cálculo do escoamento uniforme em canais naturais;
- Realizar comparações entre a formulação AC-W e a equação de Manning por meio da análise dos resultados relativos ao menor erro absoluto relativo médio e outros indicadores para dados de escoamento uniforme em canais circulares e de canais naturais;
- Comparar os resultados das aplicações da formulação AC-W com os da aplicação da fórmula de Manning;
- Obter uma relação entre os coeficientes rugosidade de Manning, apresentados na literatura, com os obtidos por meio de otimização, buscando os resultados que produzam as mínimas diferenças entre as vazões calculadas e observadas.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Escoamento uniforme em Canais

A busca por formulações para dimensionamento de canais tem atraído a atenção dos pesquisadores e engenheiros ao longo do tempo. Uma das mais conhecidas e utilizadas expressões para cálculo do escoamento uniforme permanente em canais é a formulação de Manning. A fórmula de Manning é, na verdade, a fórmula desenvolvida por Chezy e adaptada por Manning, que introduziu um coeficiente dependente da rugosidade da parede do canal.

A partir daí, vários investigadores dedicaram grande parte de seu tempo objetivando um melhor entendimento dos processos que envolvem a resistência ao escoamento, bem como a avaliação de seus coeficientes que a representam.

Neste sentido, Keulegan (1938) foi um dos pioneiros a utilizar estas equações visando obter fórmulas, para o cálculo de vazão em canais, similares às utilizadas para o escoamento em tubos. Em seguida diversos pesquisadores trabalharam perseguindo este objetivo (CABRAL DA SILVA, 1992).

Morris (1955) trouxe um novo conceito de escoamento sobre superfícies rugosas. O mesmo foi baseado no efeito apresentado pelo espaçamento longitudinal dos elementos rugosos e dos escoamentos vorticosos, quando foram determinados três tipos de escoamentos básicos: escoamento em rugosidade isolada, com ondas de interferência e quase-liso.

Tracy e Laster (1961) realizaram experimentos em um canal retangular liso com escoamento subcrítico, supercrítico e número de Froude na faixa de 0,144 a 3,64. Eles mostraram que o coeficiente de resistência calculado nas suas medições é uma função do número de Reynolds. Também foi apontado que para o mesmo número de Reynolds o coeficiente de resistência é levemente maior para um tubo liso ou um canal liso de largura infinita.

Pimenta (1966) realizou ensaios em canais retangulares, triangulares, trapezoidais e circulares de parede lisa e rugosa. Esta pesquisa estabeleceu correlações entre a velocidade média e o raio hidráulico para profundidades relativas constantes.

Kazemipour & Apelt (1980) desenvolveram um método de cálculo bastante consistente a partir de considerações da análise dimensional, tendo como finalidade a adequação à formulação universal de perdas de carga. No método desenvolvido, a geometria do canal é representada pela razão de aspecto do canal e pela relação entre o perímetro molhado e o raio hidráulico. O fator de atrito para canais é obtido através da multiplicação desse fator para tubulações pressurizadas, empregando-se a formulação universal de perdas de carga, por um parâmetro adimensional denominado fator de forma.

Featherstone e Nalluri (1988) deduziram uma expressão para a velocidade média com base nas equações de Colebrook-White e Darcy-Weisbach para o fator de atrito e perdas de carga, respectivamente. No entanto, não discutiram um ajuste que contemplasse os efeitos das correntes de circulação e da desuniformidade da tensão de cisalhamento no escoamento uniforme livre.

Cabral da Silva (1992) escreveu sobre a necessidade da consideração do fator de forma nas formulações para cálculo do escoamento em canais. Introduzindo os efeitos das correntes de circulação e da distribuição não uniforme da tensão de cisalhamento ao longo da fronteira do escoamento à superfície livre. Quando aplicado na formulação baseada na teoria da turbulência para tubos circulares sob pressão, implicou no aumento da energia dissipada no escoamento uniforme. Evidentemente, no escoamento em tubos circulares à seção plena, estes fenômenos não comparecem. Mostrou assim, o fato de que a relação do fator de atrito nos escoamentos uniformes em canais e em tubos circulares é maior do que a unidade.

Goldfarb (2002) e Goldfarb & Cabral da Silva (2007) modificaram o método de Kazemipour, introduzindo o coeficiente de atrito do escoamento em canais na formulação para tubos circulares lisos devido à formulação de von Kármán. Obteve-se como resultado uma formulação monômica bastante eficaz. Testaram também o modelo com dados para canais circulares lisos, demonstrando sê-lo mais eficiente do que a formulação de Chezy com coeficiente de Manning.

Dando continuidade, Cabral da Silva e Abreu (2010) aplicaram esse novo método modificado por Goldfarb e Cabral da Silva (2007) para canais retangulares lisos, comparando-o com a fórmula de Manning, utilizando os dados de escoamento uniforme, tendo concluído pela sua superioridade. De maneira semelhante, um novo

teste foi feito por Costa et al. (2011), tendo-se obtido, em todos os casos estudados, sucesso frente à aplicação da fórmula de Manning.

Cheng et al. (2011) e Truyen e Cheng (2012) se dedicaram ao escoamento uniforme em canais retangulares lisos, gerando dados por meio de experimentos de laboratório ou desenvolvendo equações apropriadas a esse tipo de escoamento, com base na adequação e integração dos perfis de velocidade para canais largos e estreitos.

Tempos depois, Lima (2013) considerou conjuntamente as equações de Featherstone e Nalluri (1988) e de Kazemipour, assumindo o aumento do coeficiente de atrito devido os efeitos da seção transversal assimétrica, e deduziu uma nova expressão, denominada AC-W, demonstrando a sua superioridade para escoamento uniforme em canais triangulares lisos e rugosos frente à equação de Manning.

### 3.2 Explicitação da expressão AC-W

O método de Kazemipour, desenvolvido por Kazemipour & Apelt (1979), permite o cálculo do escoamento turbulento uniforme em canais lisos a partir das equações de perda de carga para tubos pressurizados. Para tanto, o fator de atrito das equações para tubos pressurizados é substituído pelo fator de atrito para canais abertos, calculado conforme a Equação [1]:

$$f_c = \psi f \quad [1]$$

onde:  $f_c$  é o fator de atrito para canais abertos,  $\psi$  é o parâmetro de forma do método de Kazemipour e  $f$  é o fator de atrito para tubos pressurizados.

O parâmetro de forma  $\psi$  do método de Kazemipour é calculado através da razão entre dois outros parâmetros denominados primeiro e segundo parâmetros de forma,  $\psi_1$  e  $\psi_2$ .

O primeiro parâmetro adimensional,  $\psi_1$ , utilizado no método de Kazemipour, para o cálculo do escoamento turbulento uniforme em canais circulares, é calculado usando a Equação [2].

$$\psi_1 = (P/B)^{1/2} \quad [2]$$

onde:  $P$  é o perímetro molhado da seção transversal do escoamento, e  $B$  a largura de topo do canal.

O segundo parâmetro do método de Kazemipour,  $\psi_2$ , é outro parâmetro de forma, apresentado em forma de gráfico na *Figura 1*, função da razão de aspecto  $B/y_m$  e obtido a partir de dados experimentais, com  $y_m$  sendo a profundidade efetiva do escoamento e igual à relação entre a área  $A$  e largura de topo do escoamento  $B$ , ( $A/B$ ). Este parâmetro foi escolhido de forma que a combinação de  $\psi_1$  e  $\psi_2$  possibilitasse o ajuste dos valores do fator de atrito para canais abertos, tornando-os iguais aos valores dos fatores de atrito para tubulações pressurizadas, para um mesmo número de Reynolds.

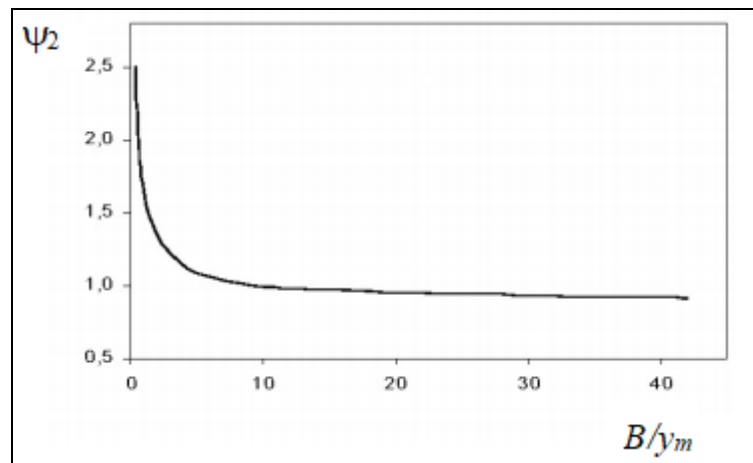


Figura 1 - Curva do segundo parâmetro  $\psi_2$  do método de Kazemipour em função da razão de aspecto  $B/y_m$

Uma vez obtidos os dois parâmetros de forma, a razão entre essas grandezas fornece o parâmetro,  $\psi$ , que representa a influência da geometria da seção transversal do escoamento na sua resistência. A Equação [3] refere-se à expressão para cálculo deste parâmetro.

$$\psi = \psi_1/\psi_2 \quad [3]$$

onde  $\psi$  é o parâmetro adimensional de forma, já definido no método de Kazemipour.

Na simplificação proposta por Cabral da Silva (1995), a partir dos dados de Tracy e Lester (1961) e de Shih e Grigg (1967), para a representação do fator de forma  $\psi$  definido por Kazemipour, procurou-se ajustar a curva mais simplificada possível que representasse o fator de forma, de maneira que expressões simples descrevam melhor a variação do parâmetro  $\psi$  com a razão de aspecto  $B/y_m$ .

Embora as relações entre  $\psi_2$  e  $B/y_m$  tenham sido desenvolvidas utilizando dados apenas para canais abertos retangulares lisos, Kazemipour & Apelt mostraram

posteriormente que a sua abordagem é também aplicável para canais rugosos retangulares e canais lisos de seções transversais triangulares e trapezoidais (Cheng et al., 2011).

É interessante destacar que o método de Kazemipour foi validado analiticamente a partir das equações para cálculo da resistência ao escoamento uniforme em canais e associando-se os efeitos de forma à distribuição não uniforme da tensão de cisalhamento no perímetro molhado. Este foi realizado por Cabral da Silva (1993), o qual desenvolveu uma metodologia para determinação analítica do parâmetro de forma, denominado  $\psi_t$ . Considerando as curvas da distribuição da tensão de cisalhamento ao longo do perímetro molhado, a formulação para este parâmetro é apresentada pela Equação [4], como:

$$\psi_t = \frac{1}{P} \int_0^P \frac{\tau(p)}{\tau_0} dp \quad [4]$$

onde:  $\psi_t$  é o parâmetro de forma apresentado por Cabral da Silva (2003);  $\tau(p)$  é a função que representa a distribuição da tensão de cisalhamento ao longo do perímetro molhado  $P$  para uma seção definida do escoamento uniforme, e  $p$  uma variável independente de posição ou distância ( $P \geq p \geq 0$ ), e  $\tau_0$  é a tensão de cisalhamento média, calculada através da Equação [5]:

$$\tau_0 = \rho g R S \quad [5]$$

onde:  $\rho$  é a massa específica da água;  $g$  a aceleração da gravidade;  $R$  é o raio hidráulico do escoamento e  $S$  a declividade do fundo do canal.

Com procedimento similar, Goldfarb e Cabral da Silva (2007) obtiveram a curva de  $\psi_t$  em função da profundidade relativa  $y/D$  para seções circulares lisas, com  $D$  sendo o diâmetro do canal, quando observaram que a curva obtida tinha comportamento semelhante a curva  $\psi$  apresentado por Kazemipour para canais circulares lisos.

Mesmo que o modelo desenvolvido para a validação do método de Kazemipour ainda tenha sido de concepção simplificada, uma vez que considera tão somente as variações da tensão de cisalhamento ao longo do perímetro molhado, a semelhança entre  $\psi$  para os valores maiores da razão de aspecto e a variação dos valores com tendência semelhante dos pontos obtidos experimentalmente, e do modelo para os valores menores, permitiram se fazer a inferência da validação do método.

A formulação desenvolvida por Goldfarb e Cabral da Silva (2007), é descrita resumidamente a seguir, sendo de caráter genérico quanto à forma do canal. A equação universal para cálculo da perda de carga por unidade de comprimento, para tubulações pressurizadas, quando aplicada para dutos de seção circular, na qual o diâmetro é igual a quatro vezes o raio hidráulico, pode ser apresentada conforme as expressões [6] e [7]:

$$f = \frac{8gJR}{V^2} \quad [6]$$

$$V = \sqrt{\frac{8gJR}{f}} \quad [7]$$

onde:  $f$  é o fator de atrito para tubulações pressurizadas,  $J$  a perda de carga por unidade de comprimento,  $R$  o raio hidráulico, e  $V$  a velocidade média do escoamento na tubulação.

Para se aplicar as Equações [6] e [7] no cálculo do escoamento em canais abertos, conforme a metodologia de Kazemipour, substitui-se na expressão [6] o fator de atrito para canais apresentado na Equação [1]. Neste procedimento, considerando-se canais com pequenas declividades, a perda de carga por unidade de comprimento  $J$  pode ser substituída pela declividade do fundo do canal  $S$ , obtendo-se as expressões [8] e [9].

$$f_c = \frac{8gSR}{V_c^2} \quad [8]$$

$$V_c = \sqrt{\frac{8gSR}{f_c}} \quad [9]$$

onde:  $f_c$  é o fator de atrito para canais abertos,  $S$  a declividade, que no caso representa a perda de carga por unidade de comprimento,  $R$  o raio hidráulico, e  $V_c$  a velocidade média do escoamento no canal.

Quando aplicado a Equação [1] na Equação [9], e comparando o resultado com a Equação [7], obtém-se a seguinte relação entre as velocidades médias para tubulações pressurizadas e canais abertos:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\psi}} V \quad [10]$$

A relação entre as velocidades apresentada na Equação [10] revela que, para um mesmo número de Reynolds, a velocidade média do escoamento no canal é menor do

que na tubulação circular pressurizada, visto que o parâmetro de forma do método de Kazemipour é sempre numericamente superior à unidade. Nesse caso, a Equação [1] confirma esta análise quando demonstra que, nas mesmas condições, o fator de atrito para canais  $f_c$  maior do que o fator de atrito  $f$  para tubulações pressurizadas.

A partir das equações de Darcy & Weisbach, Equação [11], e da equação de Colebrook & White, Equação [12], pode-se obter a Equação [13] para a velocidade média, válida para escoamento em condutos pressurizados (Featherstone e Nalluri, 1988).

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad [11]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{k_s}{3,7D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad [12]$$

$$V = -2 \sqrt{2gDS_f} \log \left( \frac{k_s}{3,7D} + \frac{2,51\nu}{D \sqrt{2gDS_f}} \right) \quad [13]$$

onde:  $L$  e  $D$  são o comprimento e o diâmetro do conduto, respectivamente;  $f$  é o fator de atrito,  $k_s$  representa a rugosidade absoluta do material do conduto;  $R_e$  é o número de Reynolds ( $R_e = VD/\nu$ );  $V$  é a velocidade média;  $\nu$  a viscosidade cinemática do fluido; e  $S_f$  representa a perda de carga,  $h_f$ , por unidade de comprimento ( $S_f = h_f/L$ ), também chamada perda de carga unitária.

Substituindo o diâmetro  $D$  pelo diâmetro equivalente  $D_{equiv} = 4R$  e  $S_f$  por  $S$ , obtém-se a Equação [14] para a velocidade média do escoamento:

$$V = -\sqrt{32gRS} \log \left( \frac{k_s}{14,8R} + \frac{1,255\nu}{R \sqrt{32gRS}} \right) \quad [14]$$

Para possibilitar a aplicação da Equação [14] no cálculo de canais em escoamento à superfície livre, substitui-se na Equação [10], a Equação [14]. Nesse caso, pode-se explicitar a velocidade média do escoamento no canal  $V_c$  em função do

parâmetro de forma  $\psi$  e da velocidade do escoamento no conduto pressurizado equivalente com velocidade  $V$ .

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\psi}} \left\{ -\sqrt{32gRS} \log \left( \frac{k_s}{14,8R} + \frac{1,255\nu}{R\sqrt{32gRS}} \right) \right\} \quad [15]$$

Multiplicando a Equação (15) pela área da seção transversal  $A$ , obtém-se a expressão [16] deduzida por Lima (2013) e denominada por Cabral da Silva e Lima (2017) como AC-W, para o cálculo da vazão volumétrica escoada no canal,  $Q_c$ :

$$Q_c = \frac{A}{\sqrt{\psi}} \left\{ -\sqrt{32gRS} \log \left( \frac{k_s}{14,8R} + \frac{1,255\nu}{R\sqrt{32gRS}} \right) \right\} \quad [16]$$

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

De forma a responder a hipótese levantada nesta pesquisa e atingir os objetivos aqui estabelecidos, foi montada uma linha metodológica que busca analisar se a aplicação da equação apresentado por Lima (2013), denominada AC-W. Aplicando-a para o cálculo da vazão em canais circulares hidraulicamente lisos e rugosos e para canais naturais em escoamento uniforme, comparando-se com a formulação de Manning.

A Figura 2, apresenta o fluxograma metodológico de investigação utilizado na presente pesquisa, abrangendo as etapas I a VII.

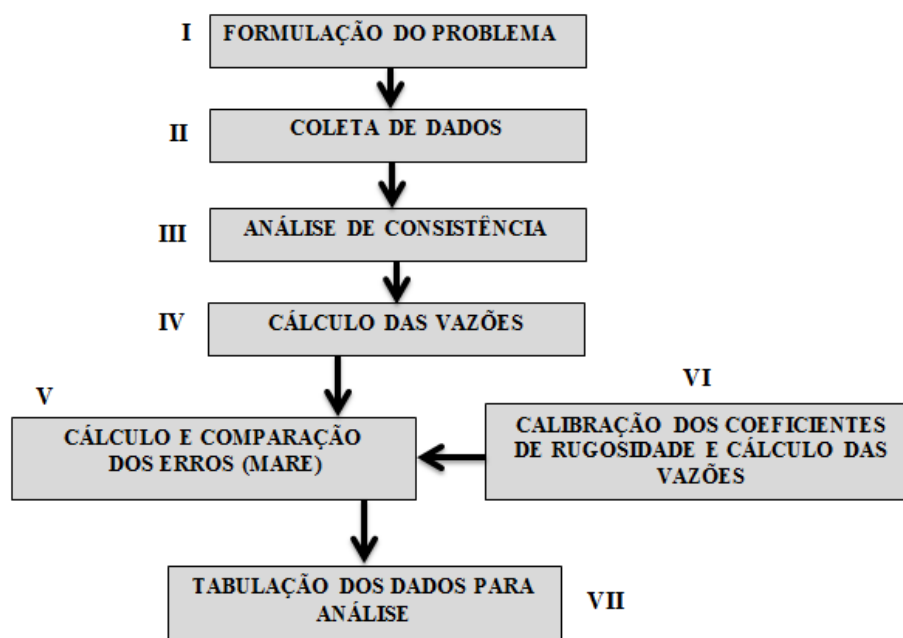


Figura 2 - Fluxograma metodológico da pesquisa

### I. Formulação do Problema

A pesquisa científica tem seu cenário definido a partir da escolha problemática a ser estudada, já que essa é base para a estruturação da pesquisa (CERVO & BERVIAN, 2002 apud LIMA et al, 2012).

Silva e Meneses (2005) afirmam que nesta se faz uma reflexão sobre o problema que pretende resolver na pesquisa, se é realmente um problema e se vale a pena tentar

encontrar uma solução para ele. A pesquisa científica depende da formulação adequada do problema, isto porque objetiva buscar sua solução.

A escolha da problemática deste estudo, como já citado anteriormente, é a investigação da aplicação da equação para cálculo de vazão com a formulação AC-W, em canais circulares e canais naturais em escoamento uniforme, para que os resultados sejam comparados com os das vazões decorrentes da aplicação da formulação de Manning. Assim, é assumido que a formulação que produz os resultados que mais se assemelham aos obtidos experimentalmente é considerada a mais eficiente.

## **II. Coleta de dados**

Para Gil (2009, apud Lima et al. 2012), a coleta de dados no estudo de caso é mais complexo que em outros tipos de pesquisa, devido que o estudo de caso requer mais de um técnica de coleta de dados, enquanto que em outras modalidades utiliza-se uma única técnica.

Os dados aqui analisados foram obtidos através de pesquisa bibliográfica; para os canais circulares foram utilizados os dados experimentais compilados e apresentados por Mangin (2010), reproduzidos no ANEXO A. Já os dados para os canais naturais foram obtidos no livro *Open-Chanel Hydraulics*, apresentados por French (1985), reproduzidos no ANEXO B.

## **III. Análise de consistência**

Na tentativa de minimizar os erros decorrentes das medições dos dados experimentais, faz-se necessário uma análise de consistência. Esta por sua vez foi atingida com alguns cálculos preliminares e a consideração de alguns critérios. Os critérios utilizados na análise de consistência foram baseados nos valores da relação entre os fatores de atrito  $f_c/f$ . A seção 5.2 deste trabalho aborda de forma mais detalhada este procedimento.

## **IV. Cálculos das vazões**

Nesta etapa, foram aplicadas as formulações investigadas para o cálculo das vazões para os dados coletados para os canais circulares e naturais, após serem feitos os cálculos preliminares e a análise de consistências dos mesmos. Utiliza-se a formulação de AC-W (Equação 16), e a formulação de Manning (Equação 17).

$$Q_C = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad [17]$$

## V. Cálculo e comparação dos erros (MARE)

A fim de se ter comparações entre os valores da vazão através dos métodos descritos pelas Equações [16] e [17], utilizou-se o MARE (erro absoluto relativo médio), definido conforme a Equação [18].

$$MARE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |(Q_{ci} - Q_{obsi})| / Q_{obsi} \quad [18]$$

onde:  $Q_{cal}$  é a vazão calculada,  $Q_{obs}$  é a vazão observada,  $m$  é a quantidade de vazões calculadas e observadas.

## VI. Calibração dos coeficientes de rugosidade e cálculo das vazões

Para a calibração, foi utilizado o procedimento denominado tentativa e erro, nos quais são atribuídos valores ao parâmetro a ser calibrado, verificando o valor da função objetivo (MARE), conferindo a sua evolução em gráficos, até a observação do valor mínimo, que não é único.

## VII. Tabulação dos dados

Nesta etapa, são interpretados e analisados os dados que são tabulados, os quais foram desenvolvidos com auxílio dos recursos computacionais, dando suporte para elaboração das tabelas, figuras e gráficos. A análise foi feita de forma a atender aos objetivos da pesquisa e para comparar e confrontar dados e provas, com o objetivo de confirmar ou rejeitar a hipótese ou os pressupostos da pesquisa.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Dados utilizados

#### 5.1.1 CANAIS CIRCULARES LISOS E RUGOSOS

Os dados experimentais de canais circulares aqui utilizados foram extraídos da dissertação de Steven F. Mangin (MANGIN, 2010). O autor utilizou dados experimentais de diversos pesquisadores apresentados na Tabela 1, abrangendo três tipos de material, conseqüentemente várias faixas de rugosidade, vazões, diâmetros e declividades.

Também foram utilizados os dados oriundos da pesquisa efetuada por Kazemipour & Apelt (1980), referentes a canais circulares hidraulicamente lisos de cimento aminato.

Tabela 1 - Pesquisadores e tipo de material do canal circular

<b>Pesquisador</b>	<b>Material</b>
Woodward & Yarnell (1920)	Concreto e Cerâmica
Wilcox (1924)	Concreto
Straub & Morris (1951)	Concreto
Neale & Price (1964)	PVC
Kazemipour & Apelt (1980)	Cimento Amianto

A Tabela 2 apresenta os valores para os coeficientes de rugosidade de Manning e a rugosidade  $k_s$  (em metros), utilizados pelos pesquisadores citados na Tabela 1.

Tabela 2 - Coeficientes de rugosidades  $n$  e  $k_s$

<b>MATERIAL</b>	<b><math>n</math></b>	<b><math>k_s</math>(m)</b>
<b>Concreto</b>	0,011	0,00170
<b>Cerâmica</b>	0,011	0,00015
	0,013	0,00015
<b>PVC</b>	0,012	$1,52 \times 10^{-6}$
<b>Amianto</b>	0,011	$7,80 \times 10^{-5}$

Fonte: Steven F. Mangin (2010); Kazemipour & Apelt (1980).

A Tabela 3 a apresenta a descrição dos dados, mostrando o tipo de material do canal, declividade, diâmetro variação da profundidade média ( $y_m$ ) e números de Froude e Reynolds, classificados como em regime turbulento, fluvial e rápido.

Tabela 3 - Descrição dos dados experimentais utilizados para canais circulares

Material	Declividade	Diâmetro (m)	$y_m$ (m)	$F_r$	$R_e$
Concreto	0,001 – 0,040	0,100 ; 0,200 ; 0,300	0,038 – 0,249	0,166 – 1,899	17.884 – 56.6039
Cerâmica	0,160 – 0,650	0,203 ; 0,101 ; 0,254 ; 0,305	0,049 – 0,198	0,187 – 1,608	20882 – 60.7138
PVC	0,003 – 0,011	0,203 – 0,305	0,052 – 0,200	0,701 – 1,754	99.020 – 84.5127
Amianto	$5,15 \times 10^{-4}$ – $6,04 \times 10^{-3}$	0,38	0,036 – 0,161	0,370 – 1,560	69.449 – 47.6789

### 5.1.2 CANAIS NATURAIS

Os dados experimentais para canais naturais em escoamento uniforme foram obtidos no livro *Open-Chanel Hydraulics*, apresentados por (French, 1985) em regime fluvial. Na Figura 3 são mostrados dados de um dos canais naturais, Indian Fork, localizado em New Cumberland, Ohio, EUA, e registrado em (Barnes, 1967). No ANEXO A são apresentados mais alguns dados dos rios em estudo.

É importante destacar as informações apresentadas por French, (1985) para os dados analisados:

- A descarga de pico do canal especificado foi determinada por um levantamento de medidor de corrente ou por uma relação precisa de descarga de estágio;
- Na proximidade da estação de medição de onde a descarga máxima foi determinada, o escoamento era uniforme;
- A descarga máxima foi confinada dentro dos bancos do canal; ou seja, o fluxo não ocorreu nas planícies da inundação, e sim na seção principal do rio.

Foram analisados um total de 22 medições de vazões, de 17 rios norte-americanos. Estes apresentaram 12 tipos de rugosidade diferentes.

3-1215. Indian Fork below Atwood Dam, near  
New Cumberland, Ohio

*Gage location.*—Lat 40°31'30", long 81°17'20", in SE¼ sec. 28, T. 15 N., R. 7 W., on left bank 500 ft downstream from Atwood Dam, 0.5 mile upstream from mouth, and 1.5 miles southeast of New Cumberland, Tuscarawas County. Section 1 is about 300 ft downstream from gage.

*Drainage area.*—70.3 sq mi.

*Date of flood.*—May 11, 1948.

*Gage height.*—10.27 ft at gage; 9.99 ft at section 1.

*Peak discharge.*—768 cfs.

*Computed roughness coefficient.*—Manning  $n=0.026$ .

*Description of channel.*—Bed and banks are composed of clay.

Banks are clear except for short grass and exposed tree roots in some places.

*Reach properties*

Section	Area (sq ft)	Top width (ft)	Mean depth (ft)	Hydraulic radius (ft)	Mean velocity (ft per sec)	Length (ft) between sections	Fall (ft) between sections
1	280	52	5.4	4.87	2.74	.....	.....
2	273	51	5.4	4.82	2.82	257	0.08
3	279	52	5.4	4.97	2.76	202	.05

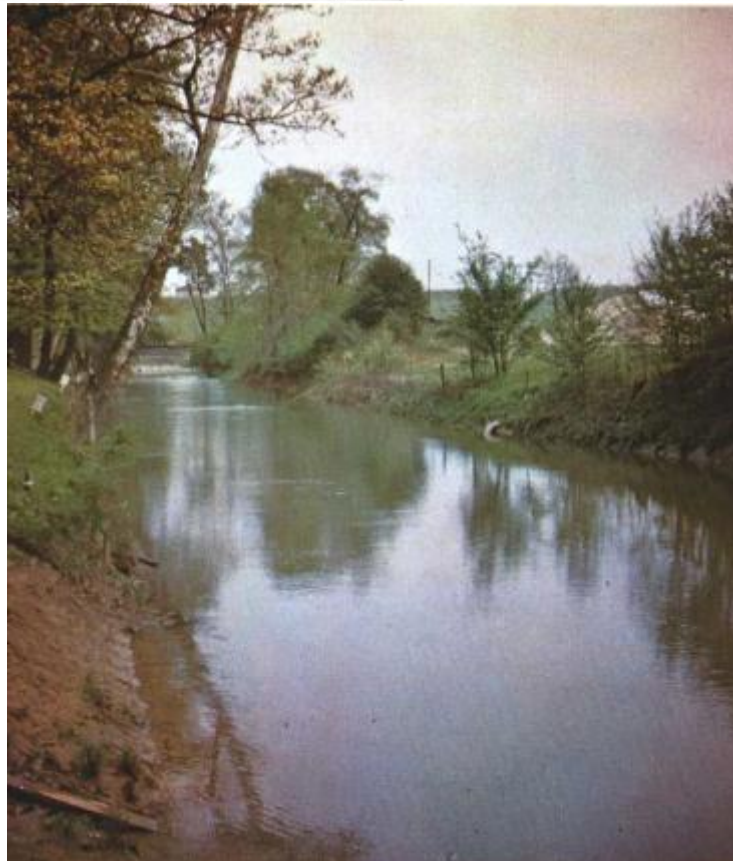
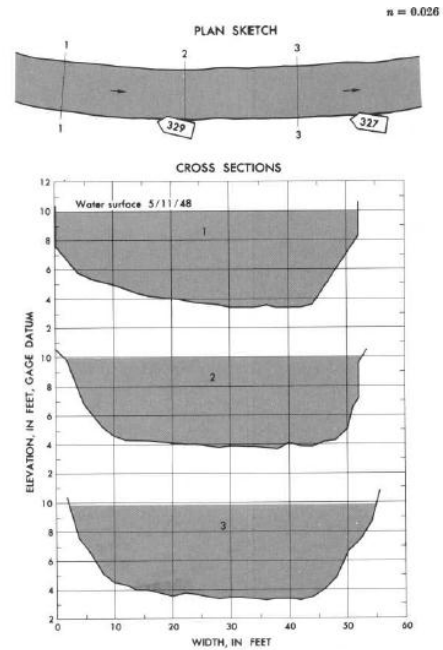


Figura 3 - Dados de escoamento uniforme do rio Indian Fork, 11 de maio de 1948  
Fonte: French (1985).

A Tabela 4 a apresenta a descrição dos dados, mostrando os valores máximos e mínimos de declividade, coeficientes de rugosidade, número de Froude e Reynolds

Tabela 4 - Descrição dos dados experimentais utilizados para canais naturais

<b>N° de Rio</b>	17
<b>Declividade</b>	$2,5 \times 10^{-4} - 5,5 \times 10^{-3}$
<b><math>k_s</math> (m)</b>	0,086 - 1,8
<b>n</b>	0,026 - 0,043
<b>Fr</b>	0,184 - 0,653
<b>Re</b>	$3,10 \times 10^6 - 2,39 \times 10^8$
<b>N° total de vazões</b>	22

O coeficiente  $n$  de Manning foi calculado, segundo French (1985), por meio da Equação [19].

$$n = \frac{\phi}{Q} \left\{ \frac{(h + h_u)_1 - (h + h_u)_N - \sum_{j=2}^N (k \Delta h_u)_{j-1,j}}{\sum_{j=2}^N \frac{L_{j-1,j}}{(AR^{2/3})_{j-1} (AR^{2/3})_j}} \right\}^{1/2} \quad [19]$$

onde:  $h$  é elevação da superfície da água na seção em relação ao dato comum a todas as seções;  $(\Delta h_u)_{j-1,j}$  é a variação na velocidade no topo entre as seções  $j - 1$  e  $j$ ,  $h_u = \alpha \bar{u}^2 / 2g$  = velocidade de topo na seção;  $k$  = contabilização de coeficientes para a não uniformidade do canal;  $h_f$  é a perda de energia em um alcance devido à fricção dos limites;  $\phi$  é um coeficiente que explica o sistema de unidades utilizado e  $L_{j-1,j}$  é a distância entre as seções  $j - 1$  e  $j$ .

Para calcular as vazões através da AC-W faz-se uso do parâmetro de rugosidade  $k_s$ , este por sua vez foi obtida através da fórmula de Strickler (1923), que relaciona o número de Manning com a rugosidade  $k_s$  em unidades métricas.

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{8,16\sqrt{g}} \quad [20]$$

## 5.2 Cálculos preliminares e análise de consistência

Com os dados obtidos, é iniciada uma série de cálculos para se obter os parâmetros necessários para a posterior análise de consistência. Esses conjuntos de dados foi objeto de análises de consistência, tendo sido descartadas os conjuntos incompatíveis.

Os critérios utilizados na análise de consistência foram baseados nos valores da relação  $f_c/f$  se menores do que a unidade ou muito maiores do que os previstos pelos modelos matemáticos para as seções circulares.

Desta forma, foram descartados os dados com relação  $f_c/f$  menores do que a unidade, pois é sabido que o fator de atrito para canais,  $f_c$ , é obrigatoriamente maior do que o fator de atrito  $f$  para tubulações pressurizadas, já que nos canais há a influência das correntes de circulação com dissipação adicional de energia, conforme relatado anteriormente.

Também foram descartados os dados cuja relação  $f_c/f$  era maior que 1,4, tanto para os canais circulares quanto para os naturais. Este valor justifica-se segundo a sugestão do manual da WPCF (1970), denominado “*Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers*”. Cabral da Silva et. al (2013) analisou o escoamento uniforme em canais triangulares adotou também o valor de corte como sendo 1,6.

O estudo realizado por Goldfarb e Cabral da Silva (2007), também destaca que para canais circulares lisos os valores da relação do fator de atrito não excederam 1,3. Já no trabalho Cabral da Silva et. al. (2015), com os dados de canais retangulares lisos obtidos por Nguyen e Cheng (2012), o máximo valor de  $f_c/f$  foi de 1,25.

No APÊNDICE A, são apresentados os valores de diâmetro, declividade, profundidade média, velocidade, raio hidráulico, vazão observada e área da seção transversal utilizados nesta pesquisa após a análise de consistência para os canais circulares lisos e rugosos e o APÊNDICE B para os canais naturais.

### **5.3 Aplicações das equações AC-W e de Manning para canais circulares lisos e rugosos**

Para que seja possível utilizar a equação AC-W, é preciso determinar que valor de  $\psi$ . No caso de escoamento de tubos à seção plena, ter-se-ia  $\psi$  igual à unidade. O trabalho de Goldfarb e Cabral da Silva (2007) indicou que o valor de  $\psi$  pode ser assumido como constante igual a 1,096 (aproximado para 1,1) o qual foi adotado neste trabalho para a representação desse parâmetro.

### 5.3.1 CANAIS EM CONCRETO

Aplicando as equações AC-W e de Manning, com seu coeficiente tabelado n igual a 0,011 para canais circulares em concreto, dados obtidos por Woodward & Yarnell (1920), Wilcox (1924) e Straub & Morris (1951), e comparados ao de AC-W, tem-se as Figuras 4a e 4b, onde se compara os resultados das vazões calculadas e observadas.

A análise da Figura 4a demonstra a inadequação da fórmula de Manning com o coeficiente recomendado pelos fabricantes para a representação da vazão. É fácil notar que os valores para as vazões calculadas por esta fórmula estão superestimados, sendo sempre maiores que os valores de vazões observados. Fica evidente também que quanto maior os valores de vazão mais inconsistentes são os valores, que vão se distanciando cada vez mais dos valores observados. Estas observações se concretizam quando analisado o coeficiente angular da linha de tendência que se afasta da unidade com valor igual a 1,2425.

Quando aplicado a fórmula de Manning adotando o coeficiente igual a 0,0011 o mesmo produz um o erro absoluto relativo médio igual a 0,2788 ou 27,88%.

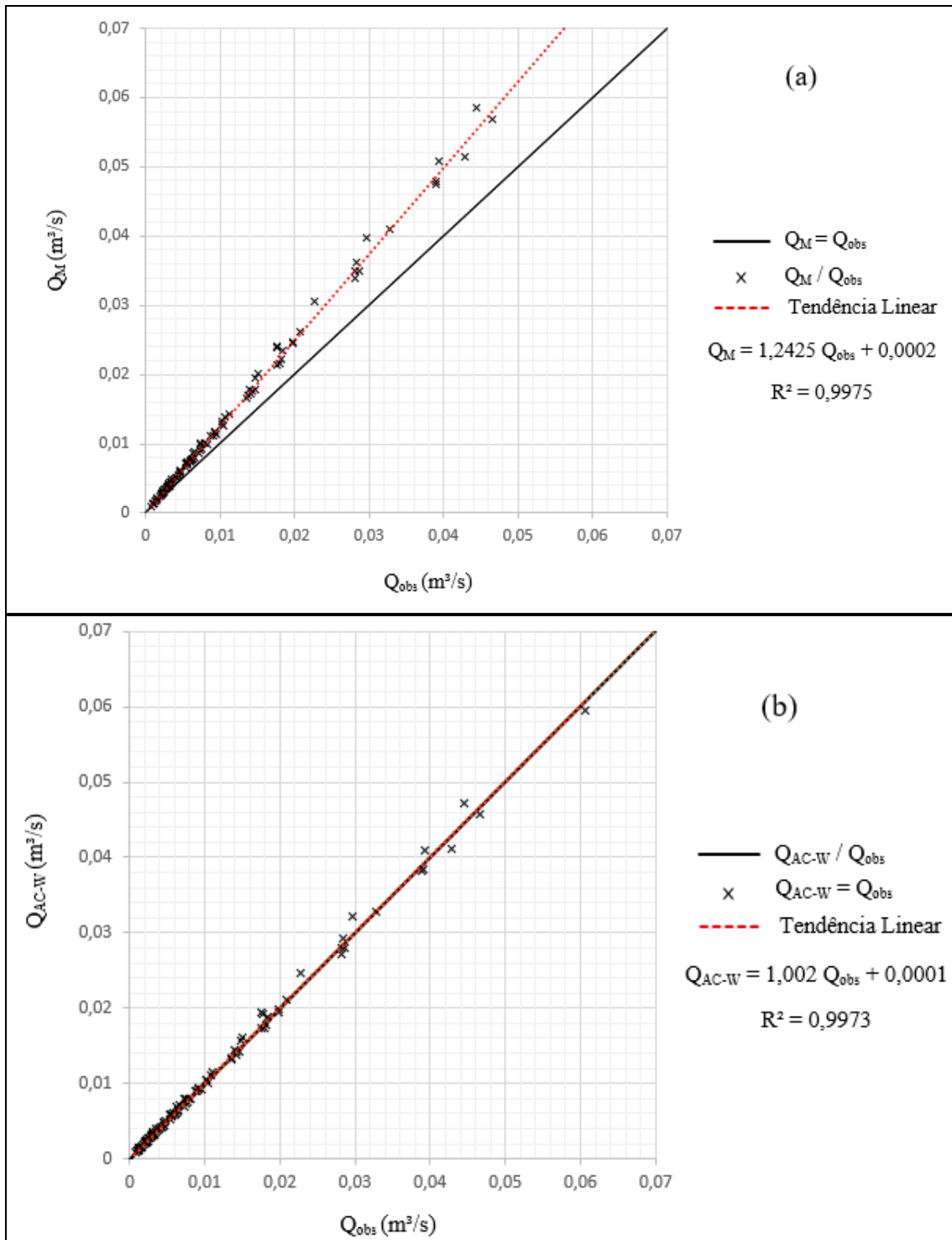


Figura 4 - Vazões observadas e calculadas para os canais em concreto. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning  $Q_M$  versus  $Q_{obs}$  com  $n$  do fabricante igual a 0,011; b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W  $Q_{AC-W}$  versus  $Q_{obs}$  com  $k_s$  indicados pelos pesquisadores, igual a 0,017m

A Figura 4b ilustra o gráfico das vazões calculadas pela AC-W versus as vazões observadas, para os canais circulares do tipo concreto. Pode ser observado um ajuste considerado de boa qualidade, haja vista a quase coincidência dos valores da reta  $Q_{obs} =$

$Q_{cal}$ , com a linha de tendência apresentando com coeficiente angular igual a 1,002. Os valores de vazão utilizando a AC-W produzirão um MARE igual a 0,0383 ou 3,83%, sete vezes menor que o MARE utilizando Manning.

Também foram plotados os valores de vazões adimensionalizadas em função da profundidade relativa do escoamento  $y/D$ , para os coeficientes de rugosidade  $n$  de Manning igual a 0,011 e coeficiente de rugosidade  $k_s$  igual a 0,017m, Figura 5.

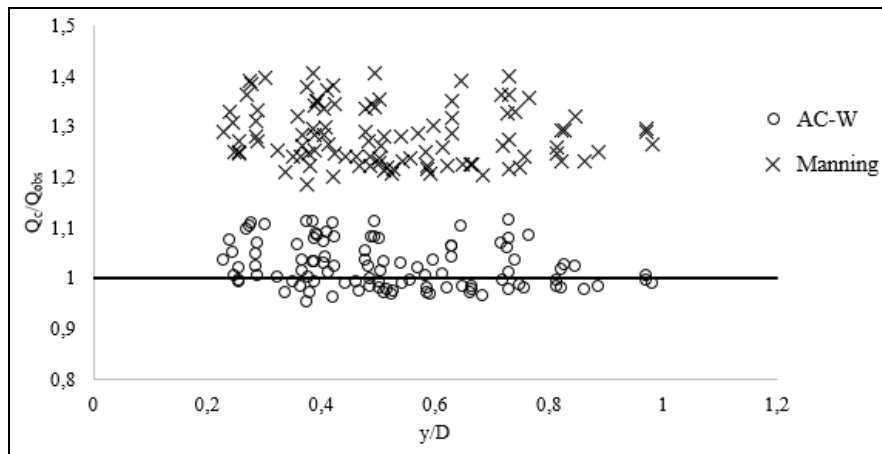


Figura 5 - Vazões adimensionalizadas calculadas pela AC-W e equação de Manning versus  $y/D$  para canal do tipo concreto

Fica evidente da Figura 5 os valores inadequados de vazão calculados pela fórmula de Manning para todas as profundidades relativas investigadas, de 0,23 a 0,98, sem indícios de tendências positivas ou negativas. Em contra partida os valores obtidos com a formulação AC-W, se mostram bem favoráveis com a concentração de pontos próximo da reta unitária.

### 5.3.2 CANAIS DE CERÂMICA

Aplicando as equações AC-W e de Manning, com seu coeficiente tabelado  $n$  igual a 0,011 para canais circulares em cerâmica, dados obtidos por Woodward & Yarnell (1920), e comparados ao de AC-W, tem-se as Figuras 6a e 6b, onde se compara os resultados das vazões calculadas e observadas.

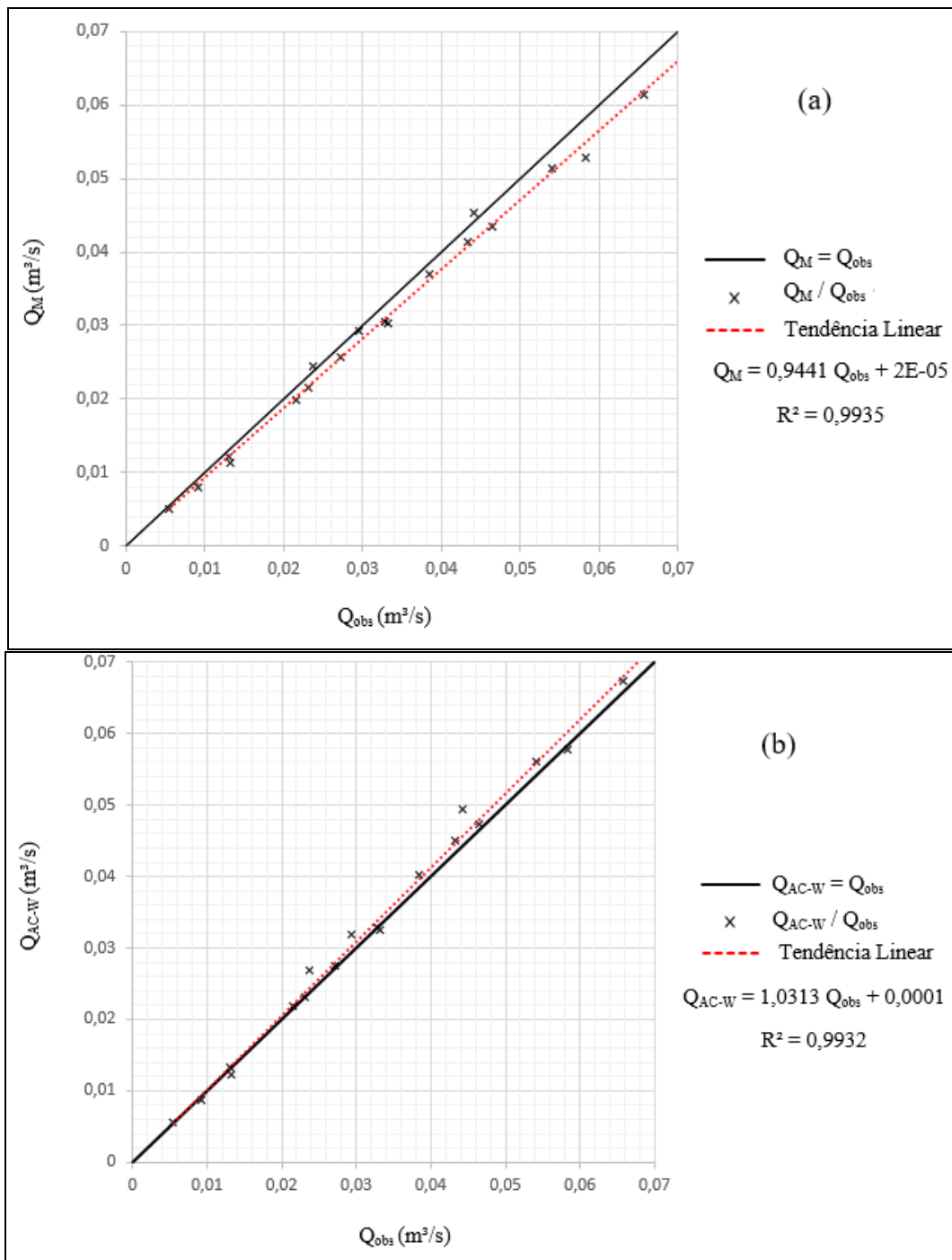


Figura 6 - Vazões observadas e calculadas para os canais em cerâmica. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning  $Q_M$  versus  $Q_{obs}$  com  $n$  do fabricante igual a 0,011; b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W  $Q_{AC-W}$  versus  $Q_{obs}$  com  $k_s$  indicados pelos pesquisadores igual a 0,00015m

Da análise da Figura 6a é possível observar um leve desajuste entre as retas utilizando a fórmula de Manning com o coeficiente recomendado pelos fabricantes de tubos para a representação da vazão. É fácil notar que os valores para as vazões calculadas por esta fórmula estão subestimados, sendo quase em sua maioria menores que o valores de vazões observados. Fica evidente também que quanto maior os valores

de vazão mais distorcidos, e vão se distanciando cada vez mais dos valores observados. Estas observações se concretizam quando analisado o coeficiente angular da linha de tendência que possui valor menor que a unidade igual a 0,9441.

Quando calcula-se as vazões a partir da fórmula de Manning adotando o coeficiente igual a 0,0011 o mesmo produz um o erro absoluto relativo médio igual a 0,06652 ou 6,65%.

A Figura 6b ilustra o gráfico das vazões calculadas pela AC-W versus as vazões observadas utilizando um coeficiente de rugosidade  $k_s$  sugerido pelo fabricante de 0,00015m. Pode ser observado um ajuste considerado de boa qualidade, produzindo valores mais precisos quando comparados com os obtidos com a fórmula de Manning, haja vista a quase coincidência dos valores em cima  $Q_{obs} = Q_c$ . A equação AC-W apresentou uma linha de tendência com coeficiente angular igual a 1,0313. Os valores de vazão produzirão um MARE igual a 0,04068 ou 4,07%. Este é 1,6 vezes menor que o MARE utilizando Manning.

Da mesma forma que nos canais em concreto, foram plotados os valores de vazões adimensionalizadas em função da profundidade relativa do escoamento  $y/D$ , para os coeficientes de rugosidade  $n$  de Manning igual a 0,011 e coeficiente de rugosidade  $k_s$  igual a 0,00015m, Figura 7.

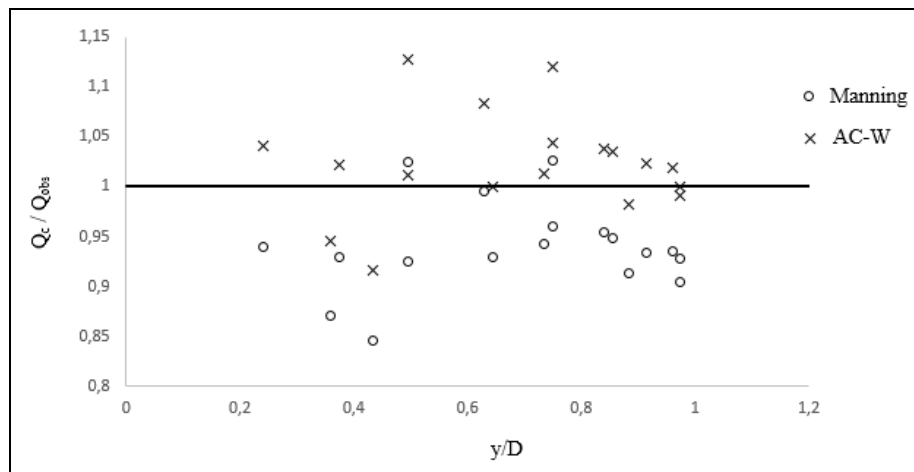


Figura 7 - Vazões adimensionalizadas calculadas pela AC-W e equação de Manning versus  $y/D$  para canal em cerâmica com coeficiente de Manning igual a 0,011

A partir da análise da Figura 7 é possível observar que os valores de vazão adimensionalizadas calculados com a fórmula de Manning e pela AC-W para todas as

profundidades relativas investigadas, de 0,240 a 0,976, não apresentam indícios de tendências positivas ou negativas.

Quando aplicado as vazões medidas por Woodward & Yarnell (1920) para canais circulares em cerâmica com coeficiente de Manning tabelado com  $n$  igual a 0,013, utilizando a formulação de Manning e comparados ao de AC-W, tem-se as Figuras 8a e 8b.

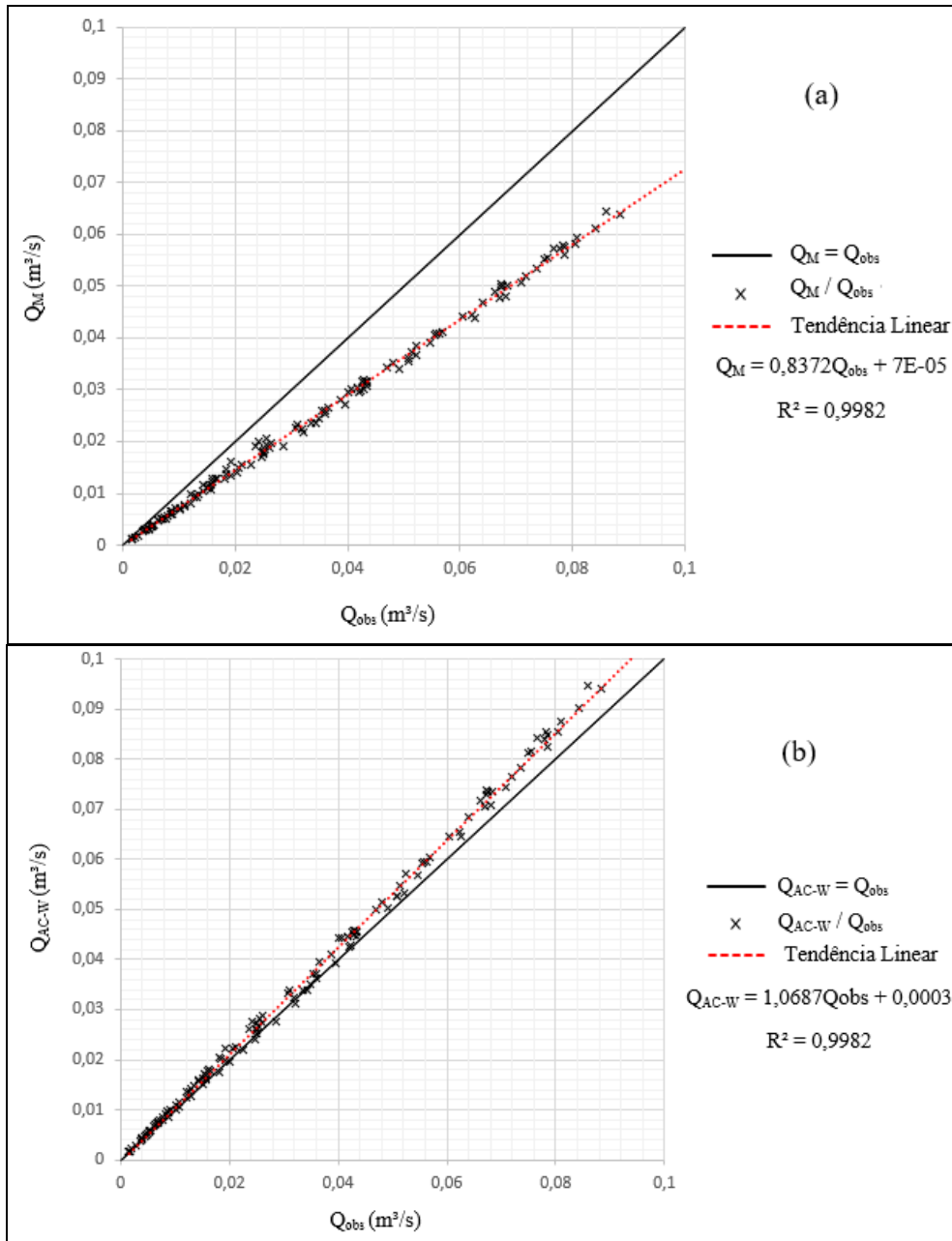


Figura 8 - Vazões observadas e calculadas para os canais em cerâmica. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning  $Q_M$  versus  $Q_{obs}$  com  $n$  do fabricante igual a 0,013; b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W  $Q_{AC-W}$  versus  $Q_{obs}$  com  $k_s$  indicados pelos pesquisadores, igual a 0,00015m

Para este canal circular cerâmico utilizando fórmula de Manning com coeficiente de rugosidade igual a 0,013, é possível observar na Figura 8a que os valores das vazões obtidos estão divergindo consideravelmente da reta ideal, em um cenário onde as vazões calculadas seriam iguais às observadas. É fácil notar que os valores para as vazões calculada por esta fórmula foram subestimados, sendo em sua grande maioria menores que o valores de vazões observados. Fica evidente também que quanto maior os valores de vazão mais inconsistentes são resultados obtidos, estes vão se distanciando cada vez mais dos valores observados. Estas observações se concretizam quando analisado o coeficiente angular da linha de tendência que se diverge bastante da unidade com valor igual a 0,8372.

Quando calculado as vazões utilizando a fórmula de Manning adotando o coeficiente igual a 0,0013 o mesmo produz um o erro absoluto relativo médio igual a 0,1569 ou 15,7%.

A Figura 8b ilustra o gráfico das vazões calculadas pela AC-W versus as vazões observadas. Nesta verifica-se um ajuste melhor, devido a uma maior coincidência dos valores da reta  $Q_{obs} = Q_{cal}$ , com a linha de tendência, apresentando coeficiente angular igual a 1,0687. Os valores de vazão utilizando a AC-W produziram um MARE igual a 0,0995 ou 9,95%, uma vez e meia menor que o MARE utilizando Manning.

Em seguida foram plotados os valores de vazões adimensionalizadas em função da profundidade relativa do escoamento  $y/D$ , para os coeficientes de rugosidade  $n$  de Manning igual a 0,013 e coeficiente de rugosidade  $k_s$  igual a 0,00015m, Figura 9.

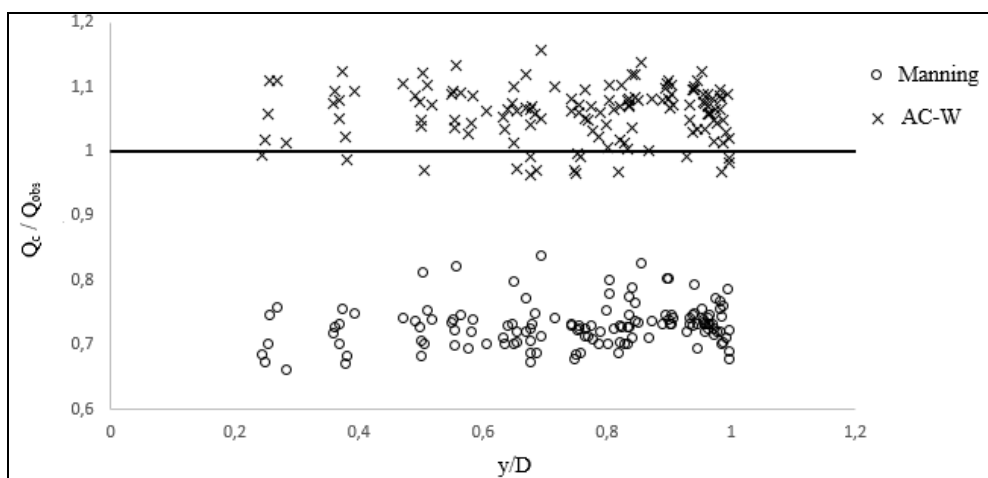


Figura 9- Vazões adimensionalizadas calculadas pela AC-W e equação de Manning versus  $y/D$  para canal em cerâmica com coeficiente de Manning igual a 0,013

Observando a Figura 9 verifica-se que os valores de vazões adimensionalizadas calculados com a fórmula de Manning e com a AC-W para todas as profundidades relativas investigadas, de 0,244 a 0,997, mais uma vez não apresentam indícios de tendências positivas ou negativas.

### 5.3.3 CANAIS DE PVC

Quando se considera as vazões medidas por Neale & Price (1964) para canais circulares em PVC com coeficiente de Manning tabelado com  $n$  igual a 0,012, utilizando a formulação de Manning e comparados com os valores obtidos pela AC-W, tem-se as Figuras 10a e 10b.

Analisando a Figura 10a nota-se a inadequação da fórmula de Manning com o coeficiente recomendado pelos fabricantes para a representação da vazão. É fácil observar que os valores para as vazões calculadas por esta fórmula estão subestimados, sendo em todas as vazões calculadas menores que as observados. Fica claro também que quanto maiores as vazões, mais inconsistentes são os valores, que vão se distanciando cada vez mais dos valores observados. Estas observações se concretizam quando analisado o coeficiente angular da linha de tendência que se diferencia consideravelmente da unidade, com valor igual a 0,7305.

Quando aplicado a fórmula de Manning adotando o coeficiente de rugosidade igual a 0,0012 o mesmo produz um o erro absoluto relativo médio igual a 0,3103 ou 31,03%.

Calculando-se as vazões utilizando a AC-W versus as vazões observadas. Observa-se um ajuste considerado de boa qualidade, haja vista a quase coincidência dos valores da reta  $Q_{obs} = Q_{cal}$ , com a linha de tendência apresentando com coeficiente angular igual a 1,009. Os valores de vazão utilizando a AC-W produzirão um MARE igual a 0,0302 ou 3,02%, 10,3 vezes menor que o MARE utilizando Manning.

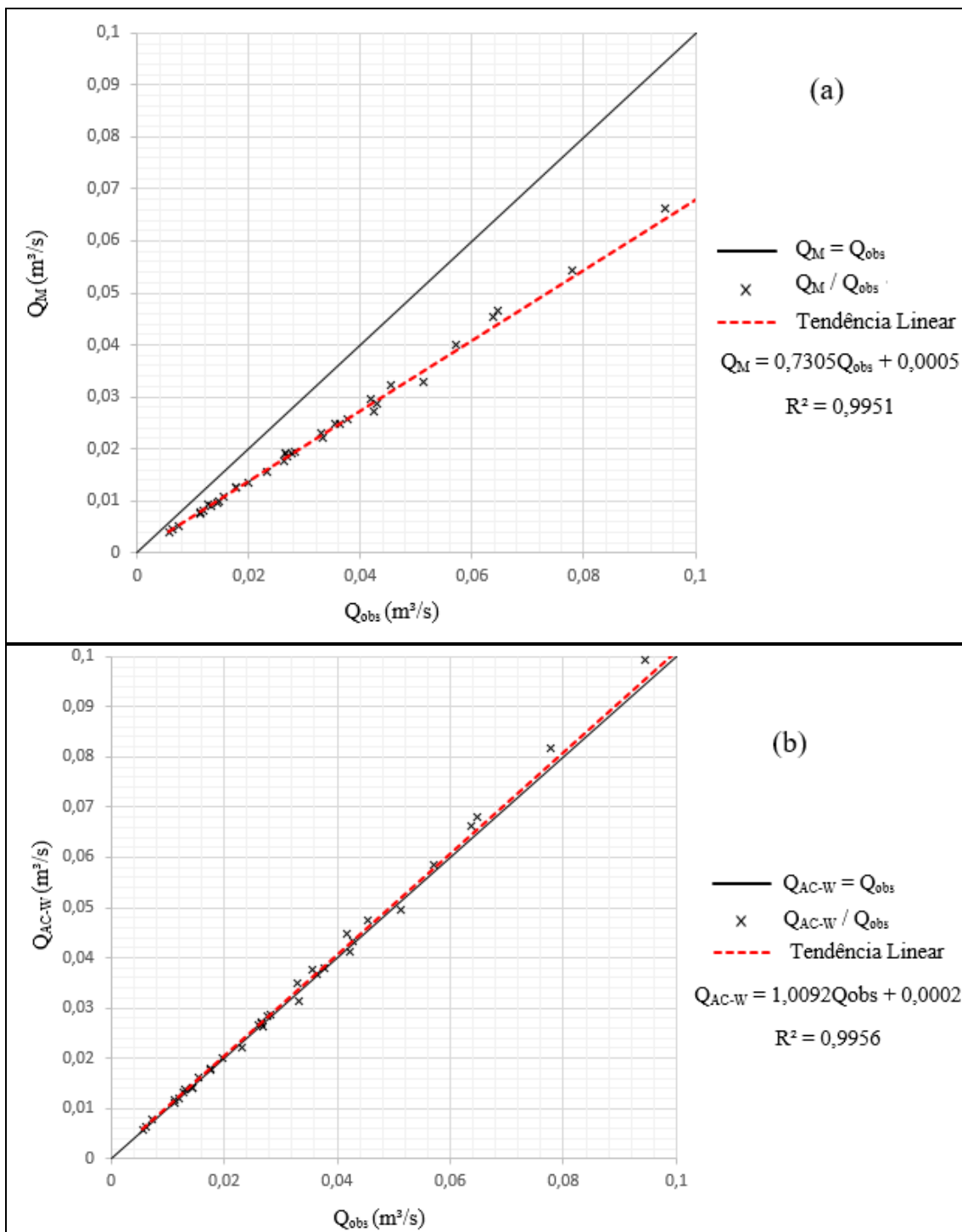


Figura 10 - Vazões observadas e calculadas para os canais em PVC. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning  $Q_{cal}$  versus  $Q_{obs}$  com  $n$  do fabricante igual a 0,012; b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W  $Q_{cal}$  versus  $Q_{obs}$  com  $k_s$  indicados pelos pesquisadores igual a 0,00015m

Foram plotados os valores de vazões adimensionalizadas em função da profundidade relativa do escoamento  $y/D$ , Figura 11.

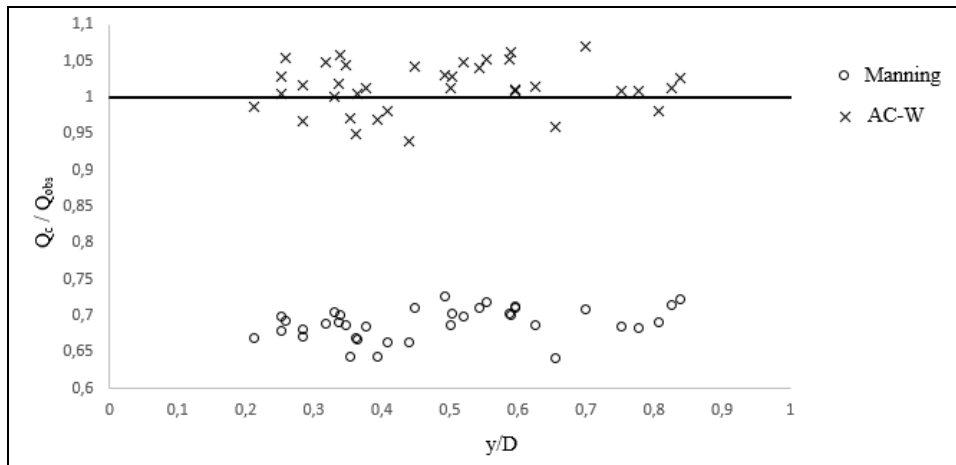


Figura 11 - Vazões adimensionalizadas calculadas pela AC-W e equação de Manning versus  $y/D$  para canal em PVC

Fica mais uma vez evidente na Figura 11 os valores inadequados de vazões adimensionalizadas calculados com a fórmula de Manning para todas as profundidades relativas investigadas, de 0,21 a 0,84 sem indícios de tendências positivas ou negativas. Em contra partida os valores obtidos para AC-W, se mostram bem favoráveis com a concentração de pontos próximo da reta  $Q_{cal}$  igual a  $Q_{obs}$ .

### 5.3.4 CANAIS DE CIMENTO AMIANTO

Aplicando a fórmula de Manning com seu coeficiente tabelado  $n$  igual a 0,011 para canais em cimento amianto, dados obtidos por Kazemipour & Apelt (1980), e comparados as vazões obtidas quando calculadas pela fórmula AC-W, tem-se as Figuras 12a e 12b, onde se compara os resultados das vazões calculadas e observadas.

Nota-se na Figura 12a que as vazões calculadas pela fórmula de Manning com o coeficiente recomendado pelos fabricantes, se mostra ineficiente. É fácil notar que os valores para as vazões calculadas estão subestimados. É bastante evidente que quanto maiores as vazões, mais inconsistentes são os resultados que vão se distanciando cada vez mais dos valores observados. Estas observações se confirmam quando analisado o coeficiente angular da linha de tendência que se diferencia consideravelmente da reta  $Q_{obs}$  igual a  $Q_{cal}$ , com valor igual 0,8269.

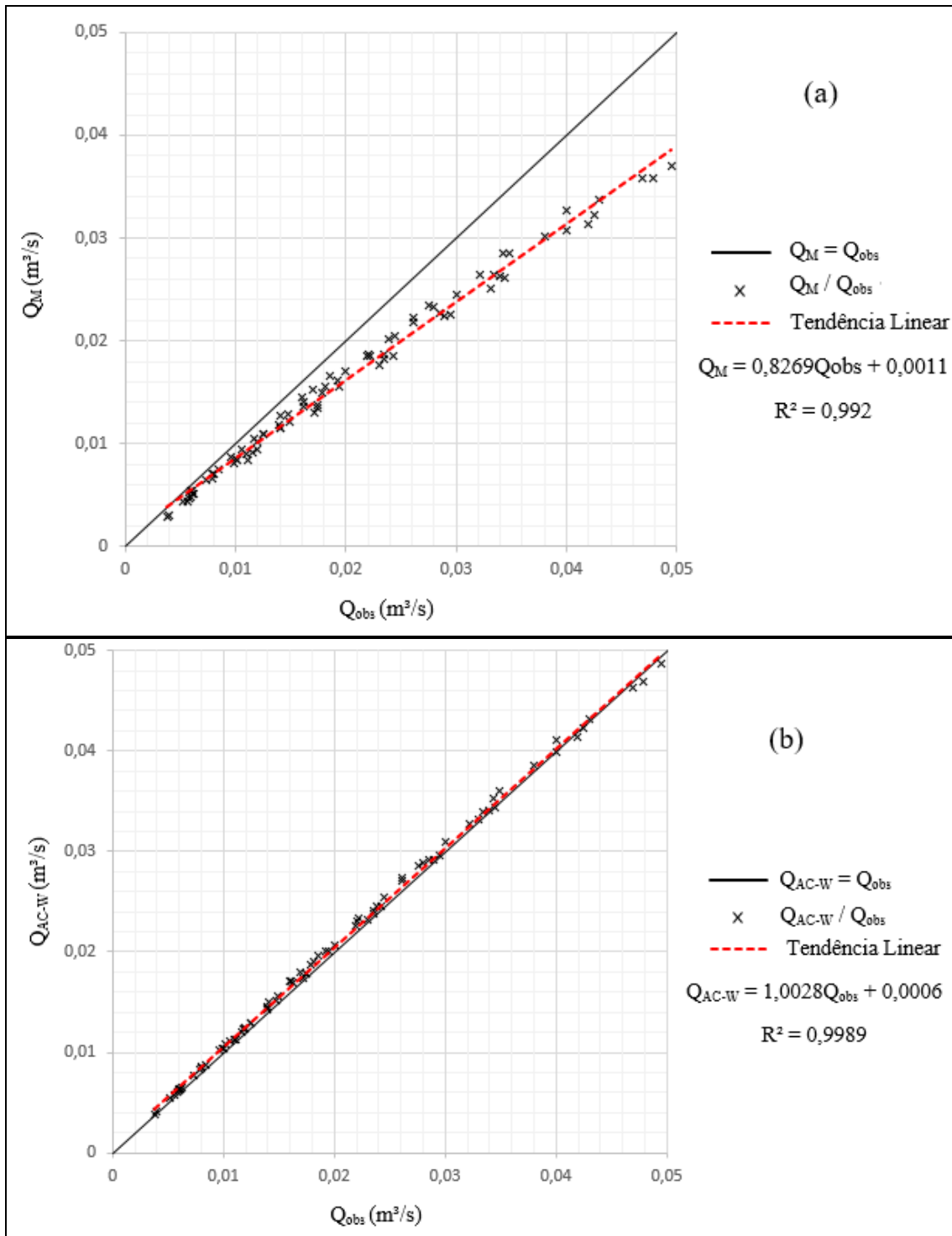


Figura 12 - Vazões observadas e calculadas para os canais em cimento amianto. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning  $Q_M$  versus  $Q_{obs}$  com  $n$  do fabricante igual a 0,012; b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W  $Q_{AC-W}$  versus  $Q_{obs}$  com  $k_s$  indicados pelos pesquisadores igual a 0,00015m

Quando aplicado a fórmula de Manning adotando o coeficiente de rugosidade igual a 0,0012 o mesmo produz um o MARE igual a 17,62%

Calculando-se as vazões utilizando a AC-W Figura 12b, observa-se um ajuste considerado bastante razoável, tendo em vista a quase coincidência dos valores da reta  $Q_{obs}$  igual a  $Q_{cal}$  com a linha de tendência, apresentando coeficiente angular igual a 1,0028. Os valores de vazões utilizando a AC-W produzirão um MARE igual 2,60%, sendo este 6,8 vezes menor que o MARE utilizando Manning.

A Figura 13 ilustra os valores de vazão adimensionalizadas em função da profundidade relativa do escoamento  $y/D$ .

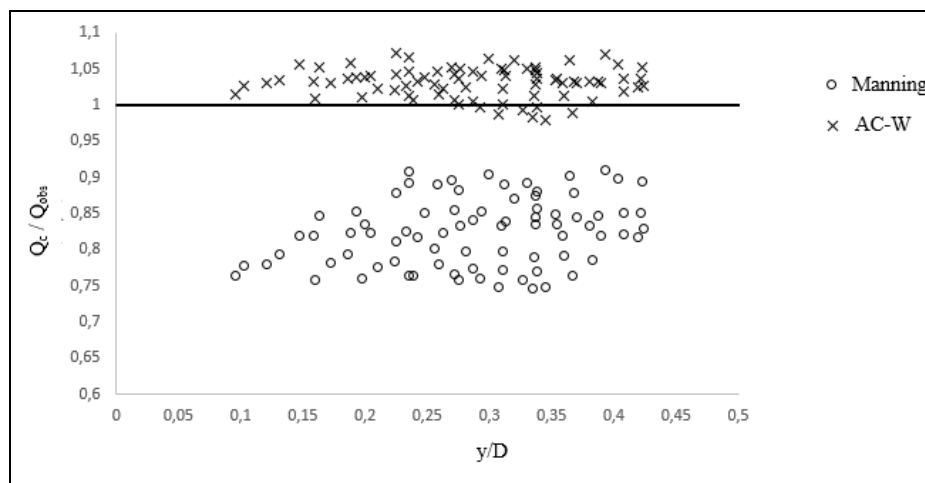


Figura 13 - Vazões adimensionalizadas calculadas pela AC-W e equação de Manning versus  $y/D$  para canal em cimento amianto

É possível observar que os valores de vazão adimensionalizadas utilizando a equação AC-W são mais consistentes e precisos quando comparados com as calculadas com uso da fórmula de Manning para todas as profundidades relativas investigadas.

Os valores de MARE proveniente da aplicação das duas formulações para cada material do canal circular estão apresentados na Tabela 5, assim como no gráfico apresentado na Figura 14.

Tabela 5 – Valores de MARE para canais circulares

Material	MARE (%)	
	Manning	AC-W
Concreto	27,88	3,83
Cerâmica	6,65	4,14
	26,93	6,38
PVC	31,03	3,02
Amianto	17,62	2,58

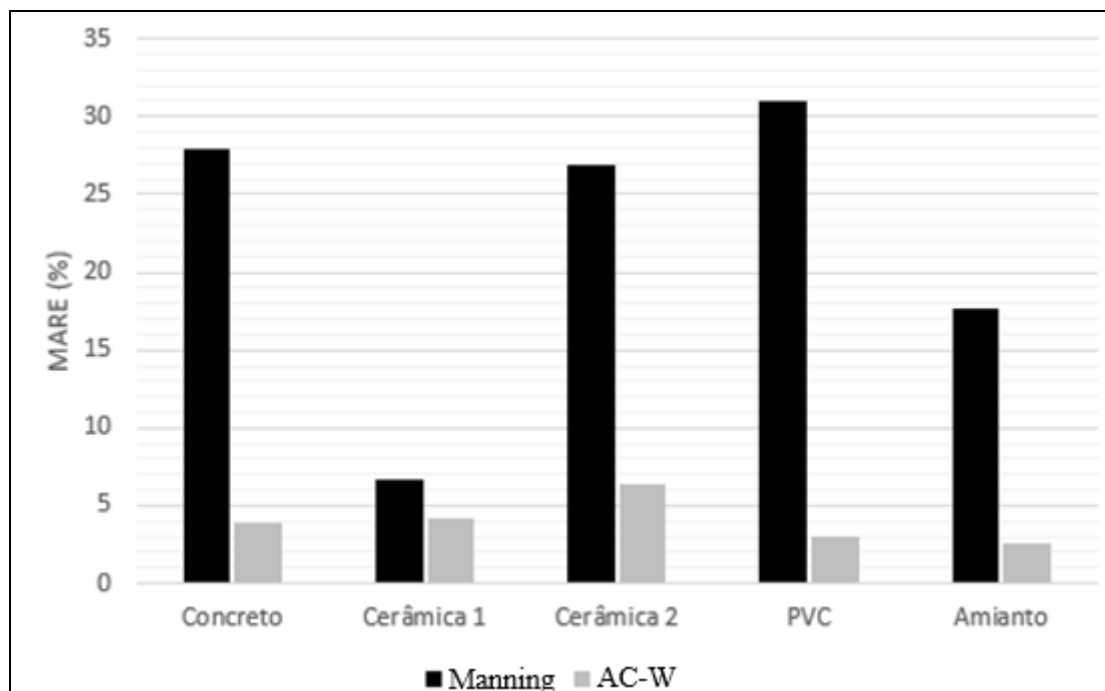


Figura 14- MARE produzido para cada equação por material do canal circular

Da análise da Tabela 5 e da Figura 14, é possível observar o quanto a equação AC-W é mais eficiente que a fórmula de Manning para todos os tipos de canais analisados, pois a mesma apresentou os menores MARE. O maior valor de erro encontrado aplicando a nova formulação AC-W foi 6,38 % no canal circular do tipo cerâmica 2 com  $n$  de Manning igual a 0,13 e coeficiente de rugosidade  $k_s$  de  $1,5 \times 10^{-4} m$ , já o menor foi para o canal em amianto com MARE igual a 2,58%. Utilizando a equação de Manning o material que apresentou maior MARE foi do tipo PVC que produziu um MARE superior a 31% e o menor com 6,65% produzido pelo canal circular de cerâmica com coeficiente  $n$  igual 0,011. É importante observar também, que todos os outros canais estudados a equação AC-W proporcionou MARE inferiores a 5%.

#### 5.4 Calibração dos coeficientes de rugosidade $n$ e $k_s$ para canais circulares

Para alcançar melhores resultados nas vazões, foram feitas buscas do valor ótimo do coeficiente de rugosidade,  $n$  para Manning e  $k_s$  para a AC-W. Esta calibração

foi feita de modo que o coeficiente adotado fosse aquela que produzisse o menor MARE local, partindo do valor estabelecido pelo autor e variando-o para mais e para menos.

Os gráficos das calibrações para cada coeficiente de acordo com cada tipo de material estão apresentados nas figuras a seguir.

#### 5.4.1 CONCRETO

A Figura 15 ilustra o gráfico de calibração do coeficiente de rugosidade de Manning para os canais circulares em concreto o valor inicial foi 0,011, e o que apresentou o menor MARE foi 0,014.

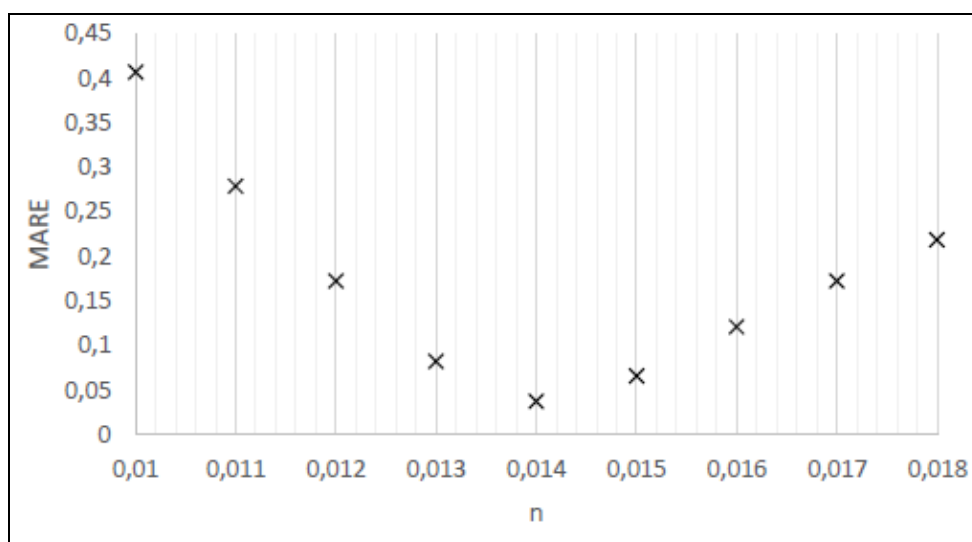


Figura 15 - Curva MARE x n (Manning) para canal circular de concreto

Da mesma forma a Figura 16, apresenta o gráfico de calibração do coeficiente de rugosidade  $k_s$  para os canais circulares em concreto, e o que apresentou o menor MARE foi com valor igual a 0,0019m. O valor inicial sugerido foi 0,0017m.

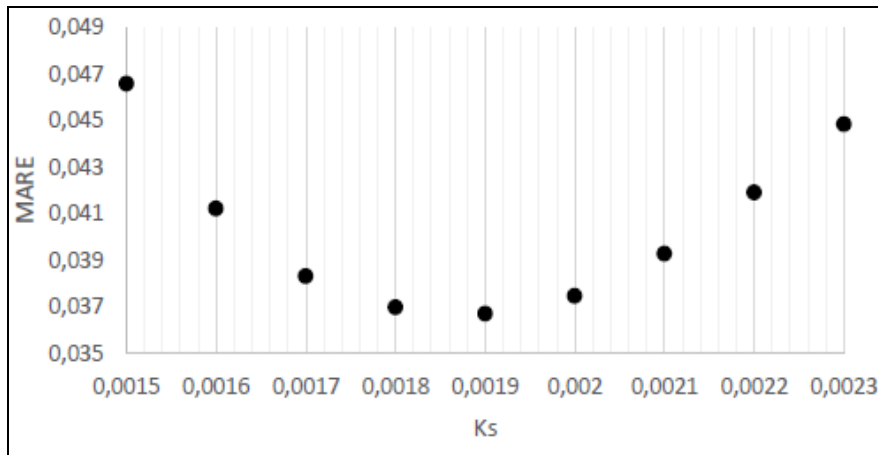


Figura 16 – Curva MARE x coeficiente de rugosidade  $k_s$  (m) para os canais circulares em concreto

#### 5.4.2 CERÂMICA

Para os canais circulares do tipo cerâmico foram trabalhados dois tipos coeficiente de rugosidade de Manning apresentados por Woodward & Yarnell (1920). Foram analisadas vazões com  $n$  igual a 0,011 e 0,013.

Neste sentido a Figura 17 apresenta o gráfico para calibração das vazões calculadas. Nota-se que o coeficiente que produziu o menor erro teve valor 0,010.

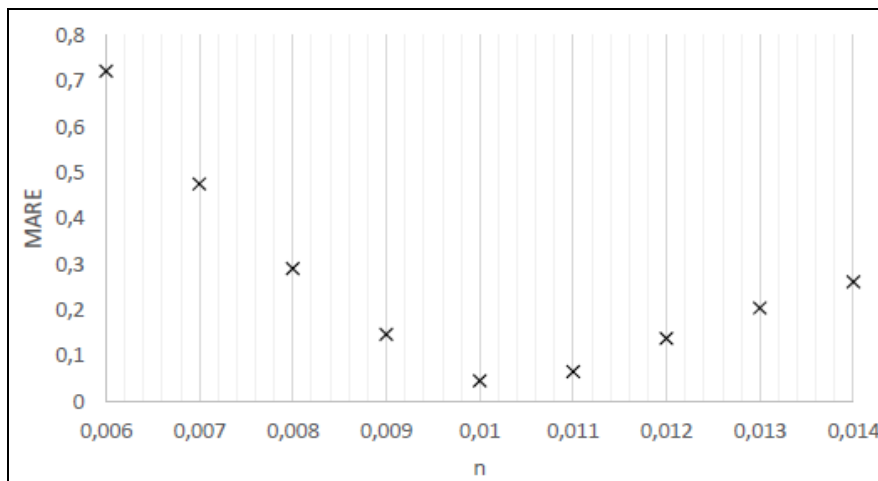


Figura 17 - Curva MARE x  $n$  (Manning) para canal circular de cerâmica

A Figura 18, apresenta o gráfico de calibração do coeficiente de rugosidade  $k_s$ , e o que apresentou o menor MARE foi 0,0019m.

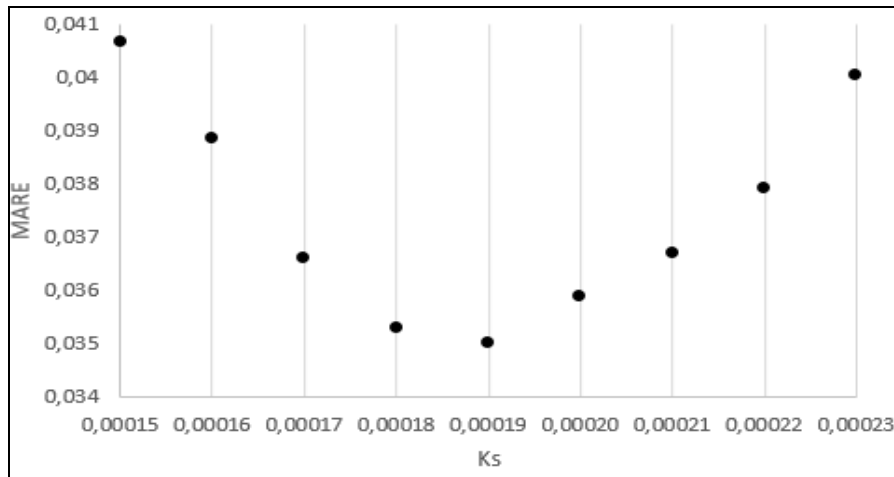


Figura 18 - Curva MARE x coeficiente de rugosidade  $k_s$  (m) para os canais circulares de cerâmica

O gráfico para calibração das vazões calculadas com  $n$  igual a 0,013 estão apresentados na Figura 19. Através desta, é possível identificar que o coeficiente  $q$  apresentou o menor valor de MARE igual a 0,0327, foi 0,011.

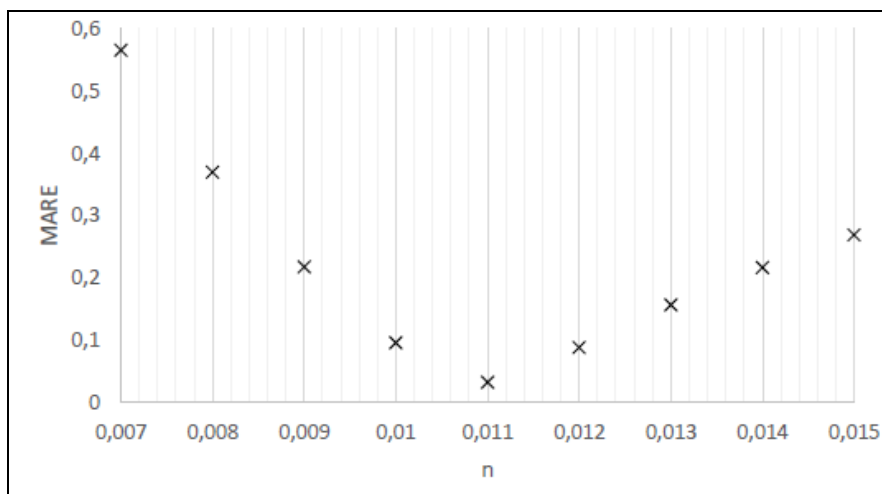


Figura 19 - Curva MARE x  $n$  (Manning) para canal circular de cerâmica

A Figura 20 ilustra o gráfico da calibração do coeficiente de rugosidade  $k_s$  para o canal de cerâmica estudado. O coeficiente 0,00030m apresentou o menor MARE igual a 0,0308.

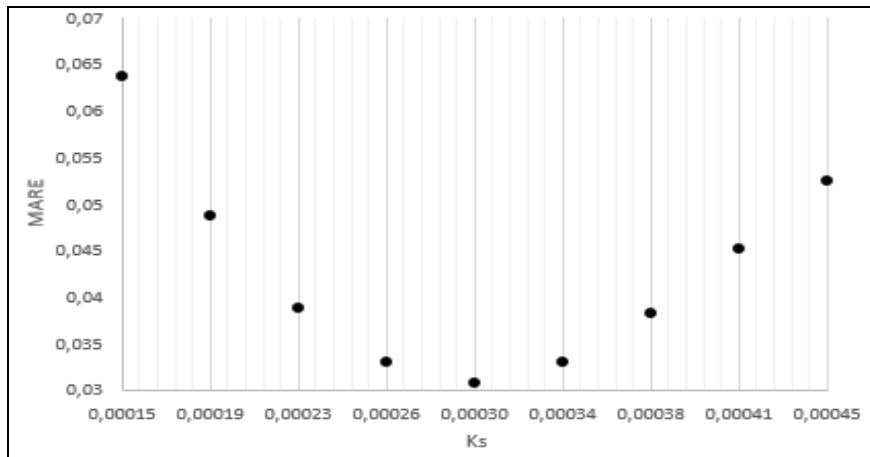


Figura 20 - Curva MARE x coeficiente de rugosidade  $k_s$  (m) para os canais circulares de cerâmica com  $n$  inicial igual a 0,013

### 5.4.3 PVC

Identifica-se na Figura 21, que o coeficiente de rugosidade de Manning para os canais circulares em PVC, quando calibrado foi  $n$  igual a 0,009, apresentando um MARE de 0,025.

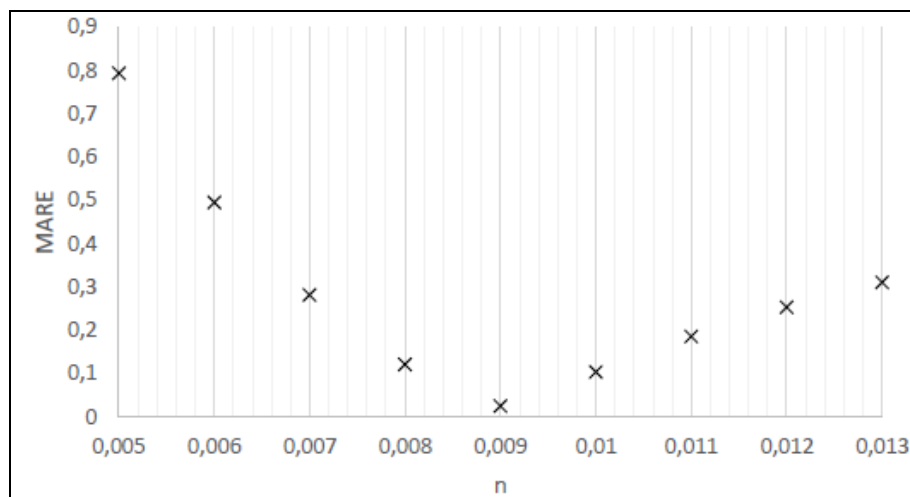


Figura 21 - Curva MARE x  $n$  (Manning) para canal circular de PVC

Já o coeficiente  $k_s$  para este tipo de material que apresentou o menor erro foi  $1,1 \times 10^{-5} \text{m}$ , com um MARE igual a 0,02449 (Figura 22).

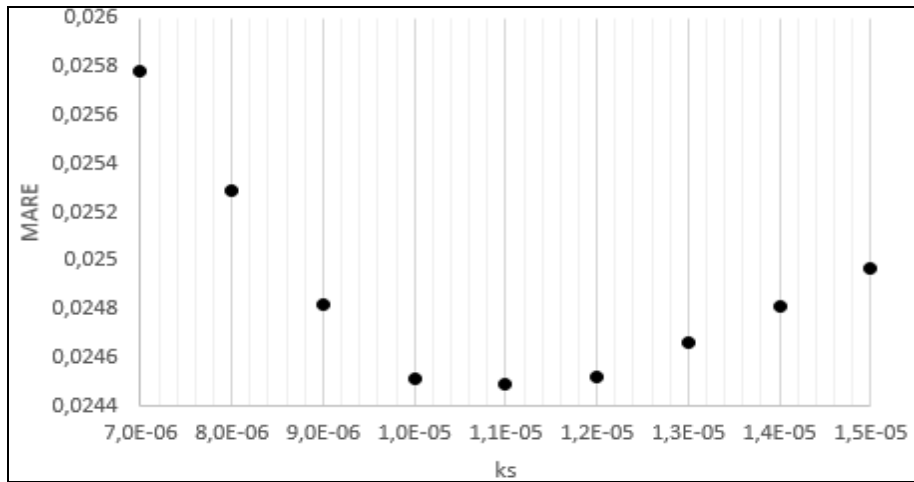


Figura 22 - Curva MARE x coeficiente de rugosidade  $k_s$  (m) para os canais circulares de PVC

#### 5.4.4 CIMENTO AMIANTO

A Figura 23, apresenta o gráfico de calibração do coeficiente de rugosidade de Manning para os canais circulares de cimento amianto, o que apresentou o menor MARE foi com valor igual a 0,010.

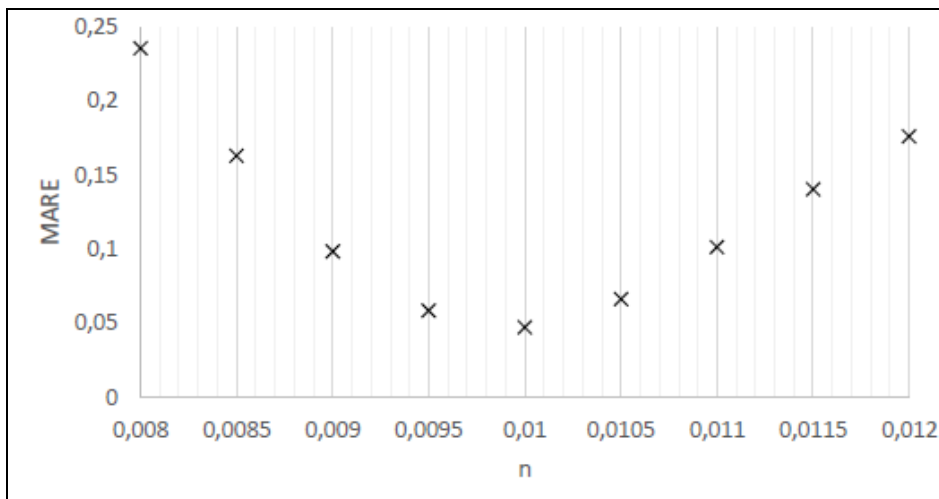


Figura 23 - Curva MARE x n (Manning) para canal circular de Cimento Amianto

Para o coeficiente de rugosidade o  $k_s$  igual a  $4,8 \times 10^{-5} \text{m}$  foi quem apresentou o menor MARE com 0,02175 (Figura 24).

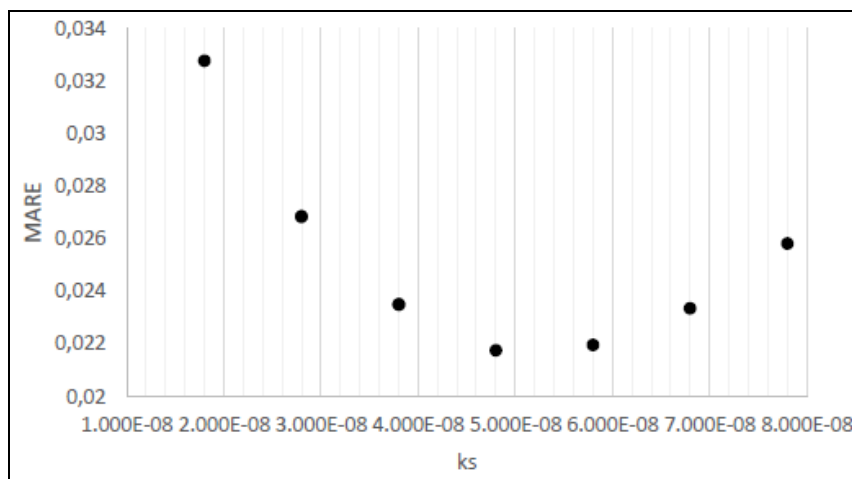


Figura 24 - Curva MARE x coeficiente de rugosidade  $k_s$  (m) para os canais circulares de Cimento Amianto

Os valores calibrados do coeficiente de rugosidade  $n$  de Manning e coeficiente de rugosidade  $k_s$  para os escoamentos dos canais analisados constam na Tabela 6, de acordo com o tipo de material do canal.

Tabela 6 - Valores calibrados dos coeficientes de rugosidade para os canais analisados

MATERIAL	n	$k_s$ (m)
Concreto	0,014	0,00190
Cerâmica	0,010	0,00019
	0,011	0,00039
PVC	0,009	$1,10 \times 10^{-5}$
Amianto	0,010	$4,80 \times 10^{-5}$

Os valores de erro absoluto relativo médio proveniente da aplicação das duas formulações a partir dos coeficientes de rugosidade calibrados estão apresentados na Tabela 7 e no gráfico da Figura 25.

Tabela 7 - Erro absoluto relativo médio utilizando os coeficientes de rugosidade calibrados para canais circulares

Material	MARE (%)	
	Manning	AC-W
Concreto	3,76	3,67
Cerâmica	4,61	3,50
	3,27	3,08
PVC	2,48	2,45
Amianto	4,74	2,35

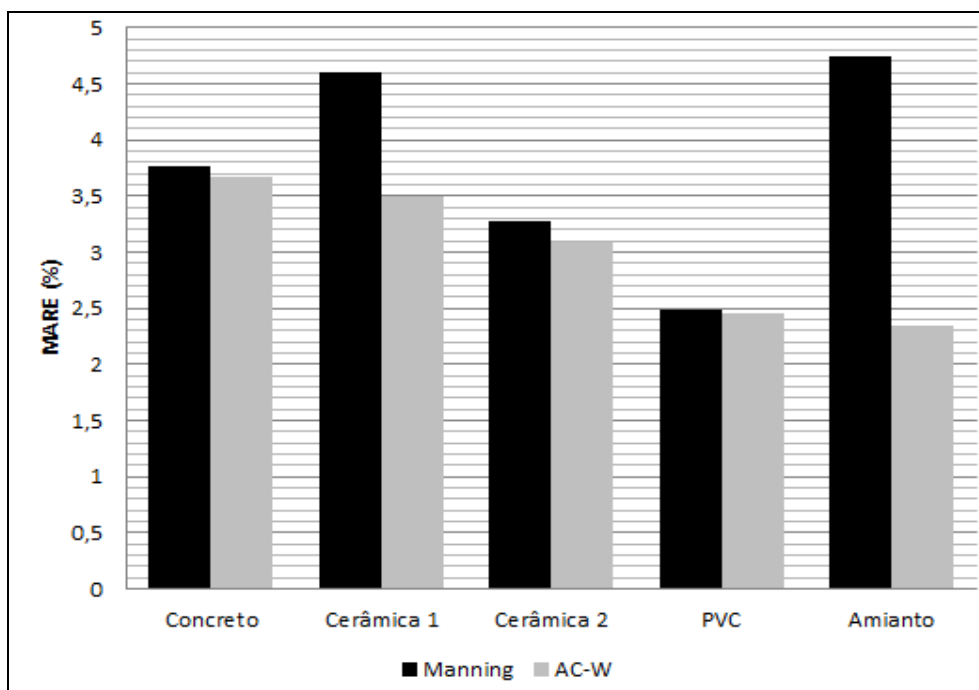


Figura 25 - MARE produzido pelas equações com parâmetros de rugosidade calibrados por tipo de material do canal circular

Da análise dos resultados apresentados a cima, é possível observar que após a aplicação das fórmulas, agora com os coeficientes de rugosidade calibrado, a equação AC-W mostra mais uma vez sua eficiência frente a fórmula de Manning para todos os tipos de canais, sendo: 2,4% para os canais de concreto;24,1% para cerâmica 1, 5,81% para cerâmica 2; 1,21% para PVC e 50,42% para canal circular em amianto.

## 5.5 Aplicações das equações AC-W e de Manning para Canais Naturais

Sabido que para a aplicação da equação AC-W é necessário à utilização do valor do coeficiente de rugosidade  $k_s$ , o mesmo foi estimado utilizando a fórmula de Strickler, apresentada por Ranga Raja (1981). Esta relaciona o coeficiente de rugosidade  $n$  de Manning com a rugosidade  $k_s$ , conforme a Equação 20.

Admitindo-se que o fator de atrito para canais e tubos  $\psi$  é parâmetro de consistência para esta pesquisa, como forma de analisa-lo foi elaborado um gráfico do com a frequência de ocorrência, Figura 26. Neste observa-se que a maior concentração dos valores de  $\psi$  está no intervalo  $1,09 < f_c/f < 1,16$ , esta mais uma vez, reforça a afirmação de Goldfarb e Cabral da Silva (2007) de que adotar  $f_c/f = \psi$  como constante igual a 1,1.

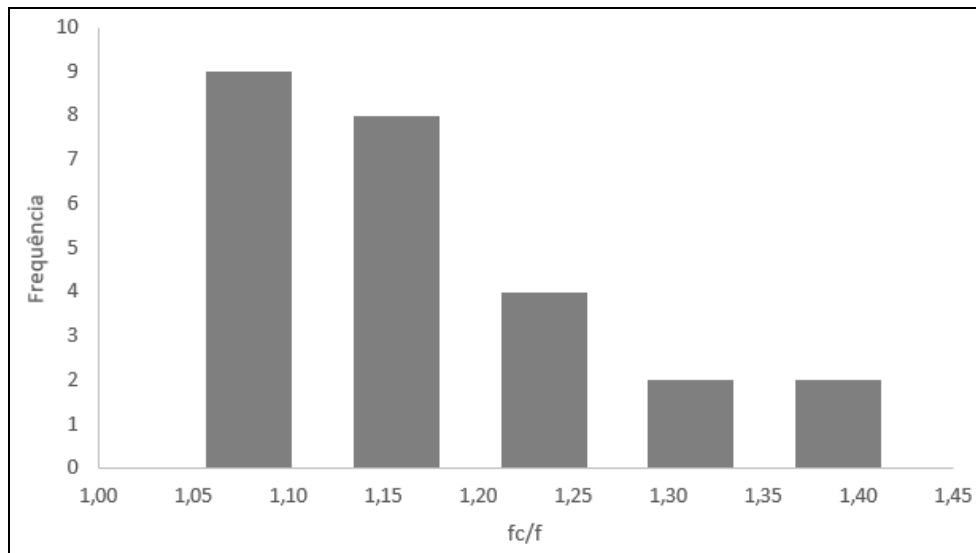


Figura 26 – Curva de distribuição da frequência para os valores de  $f_c/f$  analisados

Calculando as vazões utilizando Manning, com os coeficientes de rugosidade  $n$  apresentados por French (1985) e AC-W com os coeficientes calculados por Strickler e comparado os mesmo com as vazões observadas, tem-se as Figuras 27a e 27b.

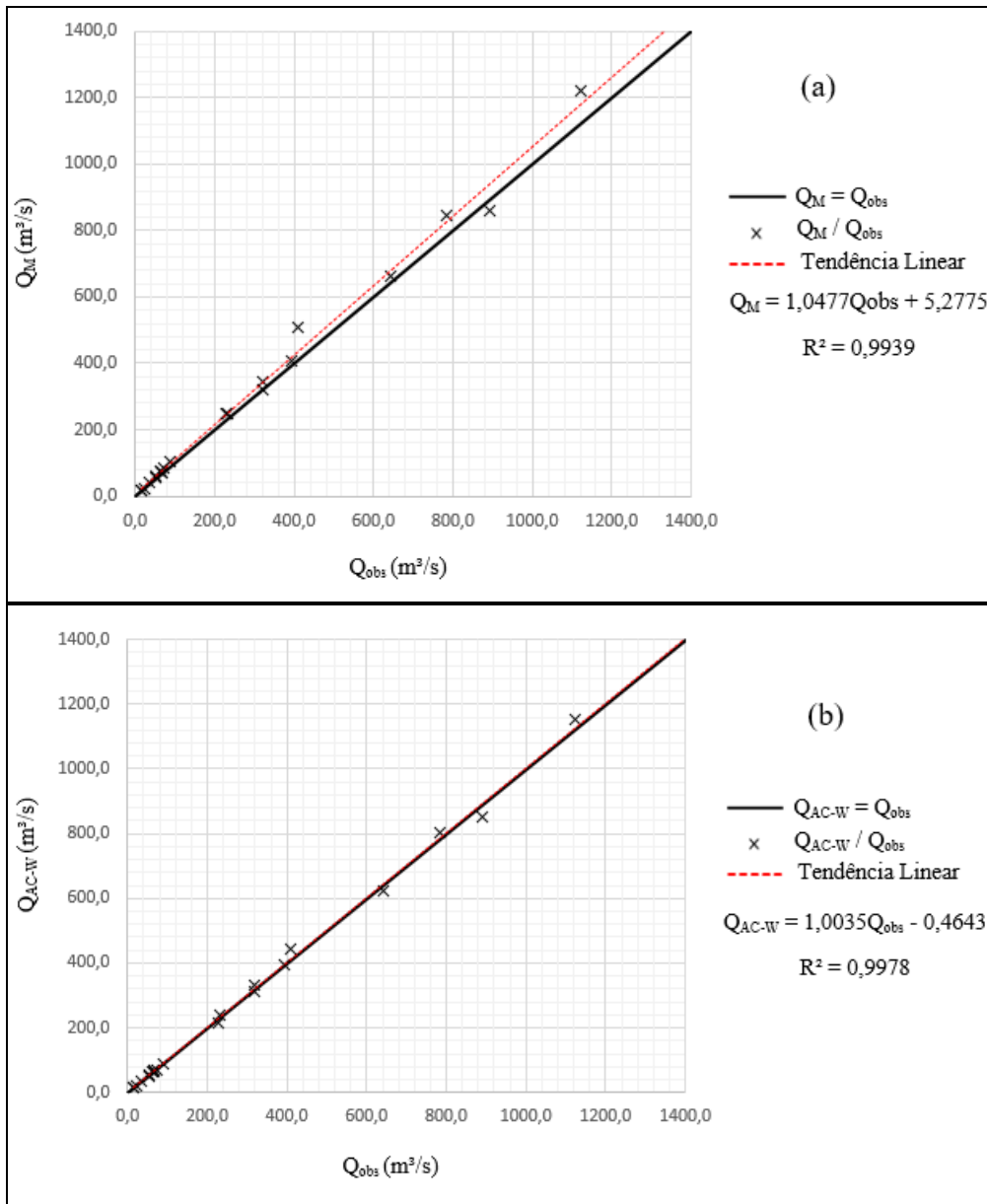


Figura 27 - Vazões observadas e calculadas para os canais naturais. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning,  $Q_M$  versus  $Q_{obs}$  com  $n$  de French (1985); b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W,  $Q_{AC-W}$  versus  $Q_{obs}$  com  $k_s$  (m) calculado por Strickler

Verifica-se, no gráfico da Figura 27a, um desvio considerável entre a linha de tendência produzida pelas vazões calculadas quando comparada com a reta  $Q_{cal} = Q_{obs}$ . Fica evidente também que quanto maiores as vazões, mais imprecisos são os valores calculados, que vão se distanciando cada vez mais dos valores observados.

Nota-se no gráfico apresentado na Figura 27b, um melhor ajuste entre as retas, evidenciando valores de vazões mais próximos os observados. Estas observações se concretizam quando analisado o coeficiente angular da linha de tendência produzido

pela equação AC-W iguala a 1,0035, o qual está mais próximo de 1 que o coeficiente angular produzido pela equação de Manning que foi de 1,0477.

A Figura 28 apresenta os valores correspondentes ao MARE das vazões calculadas e observadas para cada coeficiente de rugosidade apresentado por French (1985) e produzidos para cada equação com o uso da fórmula de Strickler para obtenção do  $k_s$ .

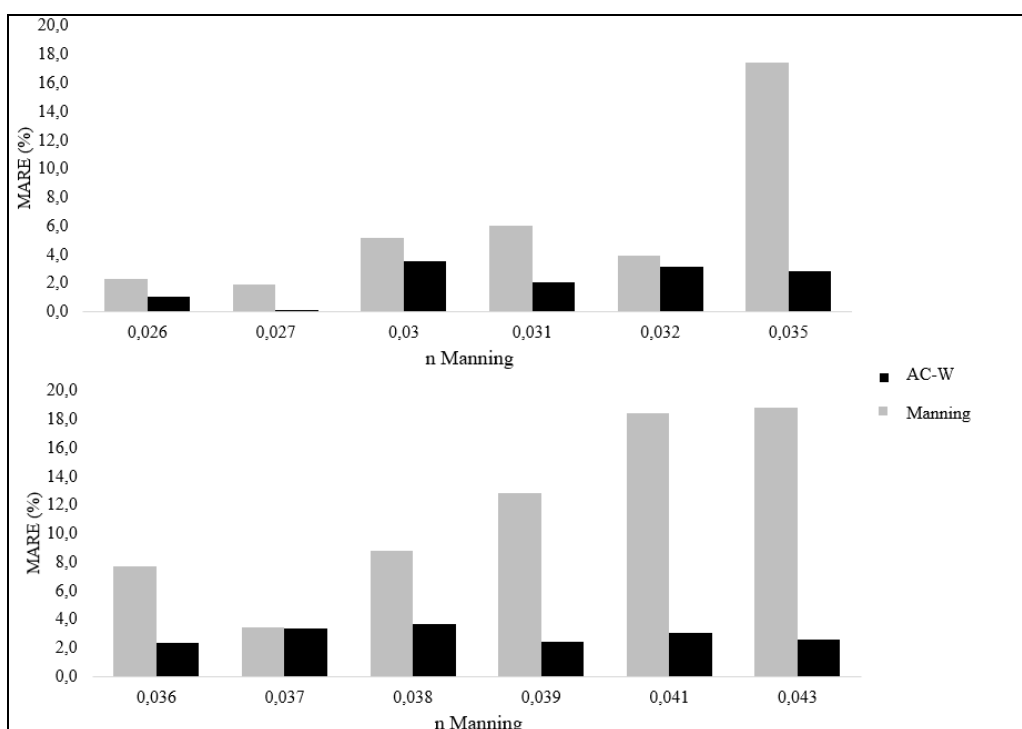


Figura 28 - Comparação dos erros para cada equação referentes a cada n de Manning

Fica evidente a partir da análise do gráfico de barras da figura acima que para todos os coeficientes de rugosidade de Manning calculados, a equação AC-W produziu menores valores de MARE.

Por fim calculou-se o MARE (Tabela 8), para todas as vazões analisadas.

Tabela 8 - Valores do MARE para as vazões com os coeficientes n de Manning apresentados por French e  $k_s$  calculados por Strickler

Equações	MARE (%)
Manning	10,25
AC-W	2,78

Percebe-se que a equação AC-W apresentou um erro de 2,78%, quando o MARE resultante do cálculo das vazões através da fórmula de Manning foi de 10,25%, significando uma relação quase três vezes maior.

## 5.6 Calibração dos coeficientes de rugosidade $n$ e $k_s$ para canais naturais

Da mesma maneira que feito para os canais circulares e na tentativa por alcançar melhores resultados nas vazões calculadas, foram feitas buscas do valor ótimo do coeficiente de rugosidade. Esta calibração foi feita de modo que o coeficiente adotado fosse aquela que produzisse o menor MARE, partindo do valor estabelecido pelo autor e variando-o para mais e para menos.

A Tabela 9 apresenta os valores dos números de Manning apresentados por French (1985) e os valores correspondentes calibrados.

O MARE foi calculado e resultou igual a 10,25% com os dados de  $n$  informados em French (1985) e o valor de 2,81% após a calibração feita.

Tabela 9 - Coeficientes de Manning calibrados e MARE

<b>n de Manning</b>	
<b>French</b>	<b>Calibrado</b>
0,026	0,027
0,027	0,028
0,03	0,031
0,031	0,032
0,032	0,034
0,035	0,041
0,036	0,039
0,037	0,038
0,038	0,042
0,039	0,041
0,041	0,048
0,043	0,051

A Figura 29 apresenta em forma gráfica os valores correspondentes ao MARE das vazões calculadas e observadas para cada coeficiente de rugosidade apresentado por French (1985).

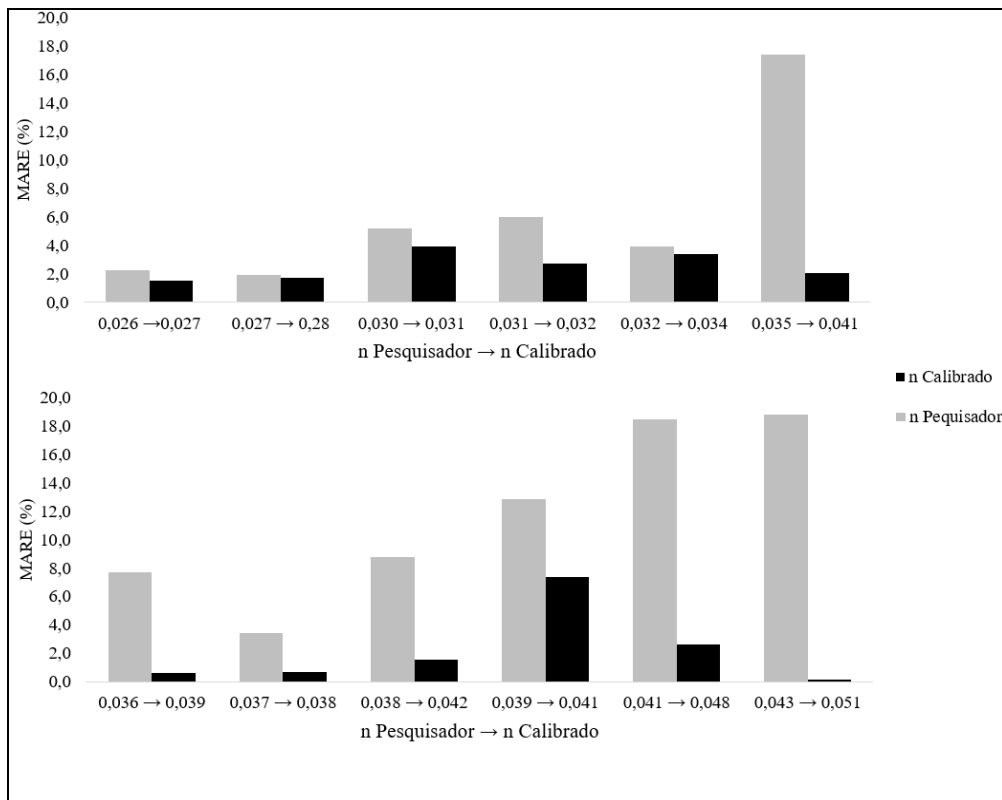


Figura 29 - Comparação dos erros calculados para cada valor de n antes e após calibração

A partir da análise da figura acima fica explícito que para todos os valores de coeficiente de Manning após a calibração apresentaram um MARE menor. Destaca-se que o coeficiente 0,043 o que apresentou uma maior redução no MARE após calibrado. Em contrapartida o coeficiente 0,027 teve a menor redução do MARE.

A Tabela 10 apresenta os valores dos coeficientes de rugosidade  $k_s$  iniciais, calculados pela fórmula de Strickler com base no número de Manning inicial da Tabela 10, e os coeficientes calibrados, pelo método de tentativa e erro, assim como os valores dos MARE produzidos.

O MARE foi calculado e resultou igual a 2,78% com os  $k_s$  calculados por meio da fórmula de Strickler e o valor de 2,02% após a calibração feita.

Tabela 10 - Coeficientes de rugosidade  $k_s$  segundo Strickler e calibrados

Coeficiente de rugosidade $k_s$ (m)	
Strickler	Calibrado
0,087	0,092
0,109	0,110
0,206	0,206
0,251	0,275
0,304	0,350
0,521	0,620
0,617	0,680
0,728	0,635
0,855	0,730
1,000	0,910
1,351	1,370
1,800	1,660

A Figura 30 apresenta em forma gráfica os valores correspondentes ao MARE das vazões calculadas e observadas para cada coeficiente de rugosidade apresentado por French (1985) e produzidos para cada equação como o uso da fórmula de Strickler para obtenção do  $k_s$  (m).

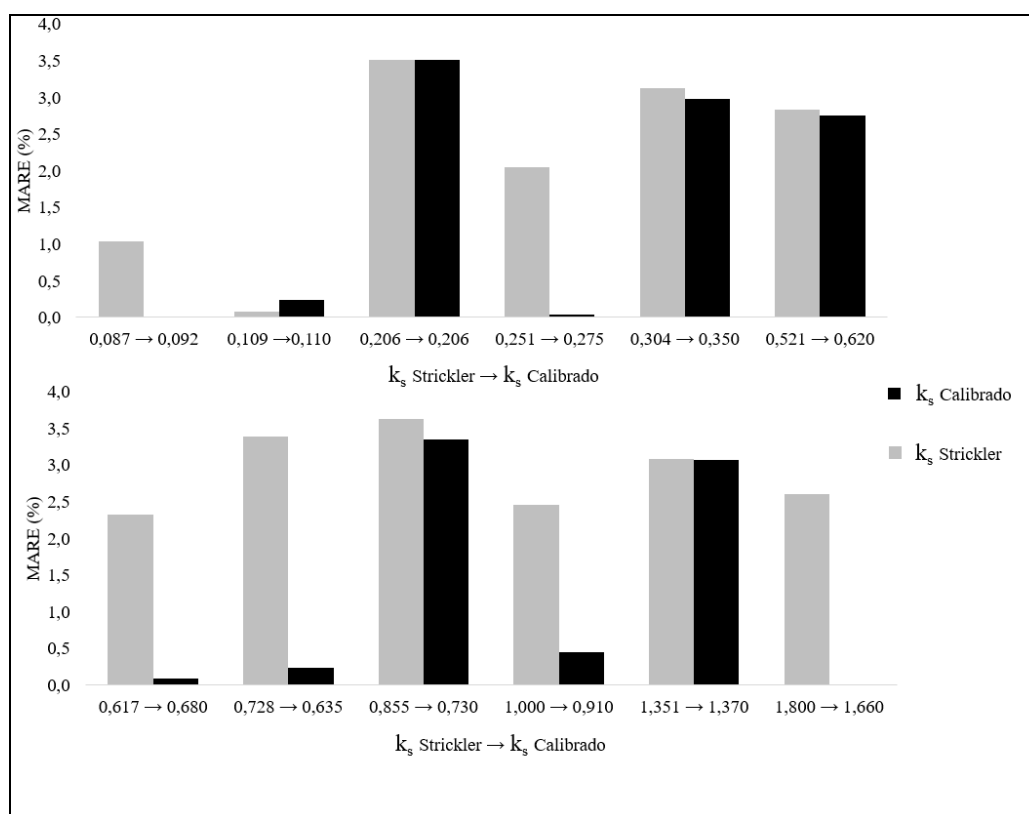


Figura 30 - Variação do erro para cada coeficiente de rugosidade  $k_s$  (m) após calibração

Analisando de forma detalhada a Figura 30, podemos evidenciar que as rugosidades 0,206m e 1,351m não tiveram redução significativa no MARE. Já as rugosidades 0,728m e 1,80m foram as que apresentaram a maior redução.

Aplicando-se as equações estudadas utilizando as rugosidades calibradas, têm-se os resultados das vazões produzidas apresentado em formato gráfico na Figura 31.

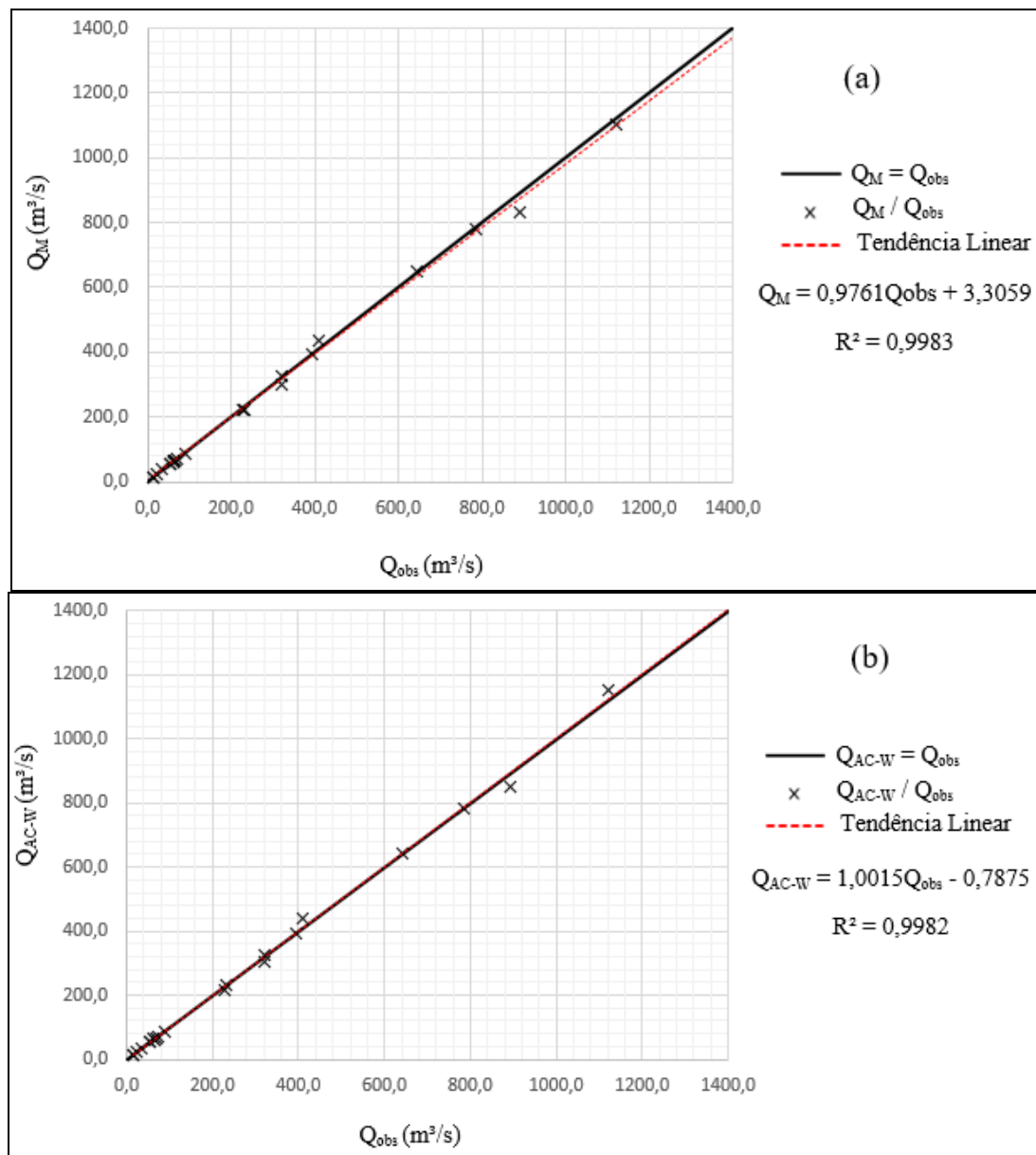


Figura 31 - Vazões observadas e calculadas para os canais naturais com coeficientes de rugosidade calibrados. a) Vazões calculadas usando a fórmula de Manning,  $Q_{cal}$  versus  $Q_{obs}$  b) Vazões calculadas usando a fórmula AC-W,  $Q_{cal}$  versus  $Q_{obs}$

Em consequência da análise gráfica podemos verificar que as vazões produzidas utilizando a equação AC-W apresentaram valores mais aproximados das vazões

observadas quando comparados com a de Manning, visto que o coeficiente angular da linha de tendências gerada para as vazões de AC-W foi de 1,0015 enquanto as vazões produzidas por Manning apresentou um coeficiente angular de 0,9761. Em termos de valores absolutos Manning se distancia da unidade 0,0239. Já a fórmula AC-W produziu 0,0015 de diferença da unidade.

Examinando de forma comparativa as vazões calculadas em termos de MARE temos a Tabela 11.

Tabela 11 – Valores do MARE para as vazões com os coeficientes de rugosidade calibrados

<b>Equações</b>	<b>MARE (%)</b>
Manning	2,81
AC-W	2,02

Observa-se que mais uma vez a equação AC-W apresentou um erro menor que as vazões promovidas pelo uso da fórmula de Manning, sendo estes 2,02% e 2,81% respectivamente.

Quando comparados os resultados apresentados na Tabela 8 que expõe os valores de MARE calculados com a fórmula de Manning, usando valores de  $n$  segundo French (1985), com o valor de MARE da Tabela 11, calculados com os coeficientes calibrados, fica evidente uma considerável redução do MARE produzido, que passa de 10,25% para 2,81%, sendo 72,6% mais eficiente após a calibração. A equação AC-W também apresentou uma redução no MARE, passando de 2,78 para 2,02% representando uma eficiência de 27,4%.

### **5.7 Relações obtidas como os coeficientes de rugosidade calibrados**

Diante dos dados apresentados elaborou-se uma relação entre os coeficientes de Manning, compilados dos dados apresentados por French (1985), e calculados pela Equação 19, com os coeficientes otimizados para cada rugosidade neste trabalho. Quando plotados os valores de  $n$  inicial por  $n$  calibrado, temos o gráfico apresentado na Figura 32.

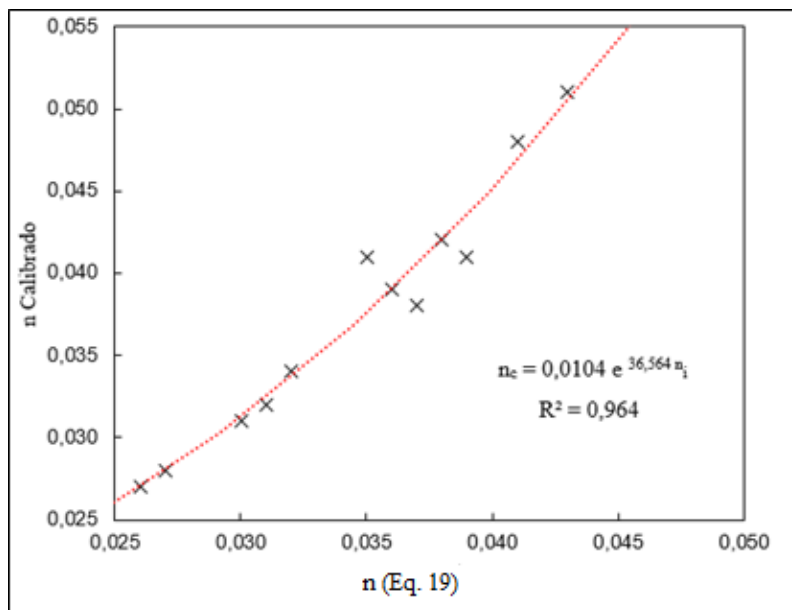


Figura 32 - Relação dos coeficientes de rugosidade para o número  $n$  de Manning calibrado e calculado pela Equação 19

A expressão produzida pela curva ajustada pôde ser reescrita como sendo:

$$n_c = 0,0104 e^{36,564 n_i} \quad [21]$$

Onde:

$n_c$  – é o valor do número de Manning Calibrado;

$n_i$  – é o valor do número de Manning tabelado em French (1985).

De posse da Equação 21 consequente a linha de tendências dos pontos plotados, calculou-se novos coeficientes de rugosidade para se obter, com maior facilidade, valores corrigidos de rugosidade. Esta proporciona que o pesquisador evite uma calibração um a um. A Tabela 12 apresenta os valores do MARE produzido quando calculado as vazões com o número  $n$  de Manning inicial com o  $n$  calibrado pela Equação 21.

Tabela 12 - Erros resultantes

Equações	MARE (%)
Manning $n_i$	10,25
Manning $n_c$	2,81
Equação 21	3,45

Nota-se que as vazões calculadas pela equação de Manning, adotando coeficientes calculados com a Equação 21, produziu um MARE 22,8% maior que o

calculado com os  $n$  calibrados. Em contrapartida, é importante destacar que a Equação 21 possibilita cálculos explícitos e mais simples. Além disso, percebe-se que o MARE calculado utilizando os coeficientes calculados pela Equação 21 foi 66,3% do MARE calculado com os valores de Manning segundo French (1985).

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Objetivando determinar a eficiência da formulação AC-W frente à de Manning, foram feitos testes usando essas formulações para o conjunto de dados experimentais de canais em escoamento uniforme circulares hidraulicamente lisos e rugosos, relativos a escoamento turbulento em regimes fluvial e rápido, e em canais naturais em regime turbulento e fluvial.

Para a pesquisa buscando determinar qual a mais eficiente expressão, AC-W ou de Manning, o critério determinante do melhor desempenho era a que apresentasse o menor erro absoluto relativo médio (MARE).

Conclui-se, com esse estudo sobre as metodologias para cálculo de vazões para canais circulares e naturais, que, em todos os conjuntos de dados testados, a expressão AC-W mostrou-se mais eficiente do que a fórmula de Manning, uma vez que apresentou os menores valores do MARE.

Ademais, em todos os gráficos plotados com os resultados das aplicações e das linhas de tendência, com os dados observados de vazão, a declividade angular ficou mais próxima da unidade, que é a ideal, relativamente à linha ajustada com os dados da aplicação AC-W.

Deve ser destacado o efeito das calibrações dos coeficientes na equação de Manning para o cálculo das vazões e do erro absoluto relativo médio em relação aos valores de French (1985), para os canais naturais, que proporcionou uma redução de 72,6% no valor do MARE.

O uso da Equação 21, que relaciona os  $n$  calibrados com os apresentados por French (1985), proporcionou valor de menor MARE, indicando melhor aderência em relação ao conjunto dos dados observados de vazões nos canais naturais, embora um pouco superior, em 13,3%, ao valor obtido com os  $n$  calibrados.

A aplicação da equação AC-W resultou no menor valor do MARE para os canais naturais, igual a 2,02%, indicando ser esta a mais eficiente equação.

Destaca-se, mais uma vez, que apesar de bastante utilizada, a fórmula de Manning apresenta limitações, sendo as principais: i) A não consideração dos efeitos turbulentos; ii) A não consideração da variabilidade da tensão de cisalhamento ao

longo da fronteira do canal; iii) Insuficiência de parâmetros para a devida consideração do fator de forma na formação da resistência ao escoamento.

Deve-se ainda ressaltar que o uso da formulação AC-W traz vantagens não discutidas nesse trabalho, com relação à temperatura da água, que não é considerada em formulações empíricas. Assim, são sugeridos estudos nesse sentido em trabalhos com a formulação AC-W, considerando os efeitos viscosos da água, segundo a sua temperatura, e as repercussões na resistência ao escoamento e nos valores das vazões.

Sugere-se ainda a continuidade de testes da formulação AC-W para escoamento em canais naturais com valores maiores do número de Froude, em regime turbulento e rápido.

Evidentemente a importância do tema para a engenharia hidráulica e o bom desempenho da formulação AC-W, pode oportunizar o seu uso em modelos matemáticos hidráulicos para uso na engenharia sanitária, e modelos para uso de avaliação de sistemas de recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARNES, H. H, Jr. **Roughness Characteristics of Natural Channels**. USGS - U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 1967.

CABRAL DA SILVA, T. **Efeitos de Forma na Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado, 85 p. São Paulo – SP, 1992.

\_\_\_\_\_. **Cálculo do escoamento uniforme em canais retangulares lisos**. In: XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Recife - Pe, 1995. v. 4, p. 93-98, 1995.

\_\_\_\_\_. **Simplificação na Metodologia de Uso do Método de Kazemipour para Cálculo da Vazão em Canais Circulares Lisos**. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - ABRH. Anais em CD-ROM. Curitiba, PA, 2003.

CABRAL DA SILVA, T.; LIMA, E. G. F. S; FIGUEIREDO, S. A. **Desenvolvimento de uma formulação para cálculo do escoamento uniforme em canais hidráulicamente lisos e rugosos**. XXVI Congresso Latinoamericano de Hidráulica Santiago, Chile, agosto 2014.

CABRAL DA SILVA, T.; LIMA, E. G. F. S; FIGUEIREDO, S. A. **A new equation for calculating the uniform flow in hydraulically smooth and rough channels**. *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress. The Hague, the Netherlands 28 June – 3 July, 2015*.

CABRAL DA SILVA, T.; MELO, I. C.; COSTA, S. G. F. **Cálculo do escoamento uniforme a partir do coeficiente de atrito modificado: novas aplicações a dados experimentais de canais triangulares lisos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, nº 1, pp. 215-222, 2013.

COSTA, S. G.; FERNANDES, C. M. I.; CABRAL DA SILVA, T. **Cálculo do escoamento uniforme em canais retangulares lisos a partir da formulação universal de perdas de carga: nova aplicação a dados experimentais**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – ABRH. Anais em CD-ROM. Maceió, AL. 2011.

CHENG, N.; NGUYEN, H., ZHAO e K; TANG, X. **Evaluation of Flow Resistance in Smooth Rectangular Open Channels with Modified Prandtl Friction Law**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 137, nº 4, pp. 441–450, 2011.

DINIZ, V. E. M. G.; SOUZA, P. A.; MORAES, A. G. **Using maximum entropy to develop explicit formulae for friction factor calculation in pipe flow**. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 145, pp. 251 – 261. 2011 WIT Press.

FEATHERSTONE, R. E., NALLURI, C. **Civil Engineering Hydraulics**. 2. Edición. BSP Professional Books. Oxford, England, 1988.

FRENCH, R. H. **Book Open-Chanel Hydraulics**. ed. 1, 750 p., 1985.

GOLDFARB, M. C.; CABRAL DA SILVA, T. **Formulação Unificada para Cálculo da Resistência ao Escoamento em Canais e em Tubos Pressurizados Lisos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Editora ABRH. Porto Alegre, v. 12, p. 133-138, 2007.

GOLDFARB M. C. **Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais Circulares Lisos**. Universidade Federal da Paraíba - UFPB. Centro de Ciências e Tecnologia. Dissertação de Mestrado, 68 p. Campina Grande – PB, 2002.

GOLDFARB M. C.; CABRAL DA SILVA, T. **Formulação Unificada para Cálculo da Resistência ao Escoamento em Canais e em Tubos Pressurizados Lisos**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. vol. 12. n. 1. pp. 133-140, 2007.

KAZEMIPOUR A. K. **Cross-Sectional Shape Effects on Resistance to Uniform Flow in Non-Circular Closed Conduits**, Universidade de Queensland, Austrália, Tese de Doutorado. 1979.

KAZEMIPOUR, A. K.; Apelt, C. J. (1980) **Shape Effects on Resistance to Smooth Semi-Circular Channels**. Department of Civil Engineering, University of Queensland, Research Report nº CE18. 1980.

KEULEGAN, G. H. **Laws of Turbulent Flow in Open Channels**, Journal of Research, National Bureau of Standards, Washington D. C., Research Paper 1151, Vol. 21, nº 6, pp 707-741, 1938.

LIMA, E. G. F. S. **Novas formulações para dimensionamento de canais considerando os efeitos de forma na resistência ao escoamento uniforme: seções triangulares hidraulicamente rugosas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba. 73p. João Pessoa, 2013.

LIMA, J. P. C.; ANTUNES, M. T. P.; NETO, O. R. DE M.; PELEIAS, I. R. **Estudos de caso e sua aplicação: proposta de um esquema teórico para pesquisas no campo da contabilidade**. Revista de Contabilidade e Organizações, Ribeirão Preto, SP, v. 6, n. 14, p. 127-144, mai.2012.

MANGIN, S. F. **Development of an Equation Independent of Manning's Coefficient n for Depth Prediction in Partially-Filled Circular Culverts**. Master of Science (Civil and Environmental Engineering Program). Youngstown State University – US. 159p. 2010.

MONTES, S. **Hydraulics of open channel flow**. ASCE Press, Reston, VA. 1998.

MORRIS, H.M. **Flow in rough conduits**. TRANS. ASCE, v 120, p.373-398, 1995.

NGUYEN, B. T.; CHENG, N. S. **Flow resistance in smooth rectangular open-channels with low aspect ratios**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 138, nº. 9, pp. 817-821, 2012.

PIMENTA, C. F. **Contribuição para o Cálculo da Perda de Carga nos Canais em Regime Uniforme**. Tese para o concurso de Professor Catedrático da POLI/USP. São Paulo, 147p, 1966.

SHIH C. C.; N. S. GRIGG **A Reconsideration of the Hydraulic Radius as a Geometric Quantity in Open Channel Hydraulics**, Proc. 12th Congres, IARH. Vol. 1, (Paper A36), Sept., pp 288-296, 1967.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 138 p.

STRICKLER A. Translates to: **Some contributions to the problem of the velocity formula and roughness factors for rivers, canals and closed conduits**. Mitteilungen des Eidgenossischen Amtes fur Wasserwirtschaft, Bern Switzerland, No. 16. 1923.

TRACY, H. J.; LESTER, C. M. **Resistance Coefficients and Velocity Distribution in Smooth Rectangular Channel**. Geological Survey Water-Supply Paper, Washington, paper 1952-A, 18 p., 1961.

WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION – WPCF. **Design and Construction Sanitary and Storm Sewers**. Manual of Practice no. 9, Washington, D.C., USA, 1970.

YEN, B. C. **Open channel flow resistance**. J. Hydraul. Eng., 128(1), p. 20–39, 2002.

## ANEXO A

**Dados experimentais utilizados para o cálculo e comparação das vazões utilizando as equações de Manning e AC-W, extraídos da dissertação de Steven F. Mangin (MANGIN, 2010) para canais circulares.**

### Dados do escoamento em canal circular de Concreto

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da secção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Q <sub>obs</sub> (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )
0,101	0,013	0,087	0,826	0,0302	0,0060	0,0074
0,101	0,003	0,090	0,396	0,0299	0,0029	0,0076
0,101	0,015	0,084	0,904	0,0305	0,0063	0,0071
0,101	0,002	0,083	0,326	0,0305	0,0023	0,0071
0,101	0,002	0,098	0,301	0,0271	0,0024	0,0080
0,101	0,003	0,098	0,367	0,0271	0,0029	0,0080
0,101	0,003	0,083	0,396	0,0305	0,0027	0,0071
0,101	0,013	0,062	0,760	0,0283	0,0039	0,0052
0,101	0,001	0,084	0,223	0,0305	0,0016	0,0071
0,101	0,003	0,074	0,385	0,0302	0,0024	0,0063
0,101	0,005	0,084	0,496	0,0305	0,0035	0,0072
0,101	0,001	0,086	0,152	0,0302	0,0011	0,0073
0,101	0,001	0,075	0,150	0,0302	0,0010	0,0064
0,101	0,013	0,074	0,755	0,0302	0,0047	0,0063
0,101	0,001	0,073	0,208	0,0299	0,0013	0,0062
0,101	0,002	0,074	0,295	0,0302	0,0018	0,0063
0,101	0,001	0,064	0,200	0,0287	0,0011	0,0054
0,101	0,015	0,078	0,818	0,0305	0,0054	0,0066
0,101	0,002	0,066	0,283	0,0290	0,0015	0,0055
0,101	0,005	0,074	0,452	0,0302	0,0028	0,0063
0,127	0,015	0,054	0,866	0,0283	0,0044	0,0051
0,127	0,005	0,059	0,508	0,0302	0,0029	0,0057
0,127	0,008	0,045	0,539	0,0247	0,0021	0,0040
0,127	0,010	0,041	0,590	0,0232	0,0021	0,0036
0,127	0,003	0,064	0,371	0,0317	0,0024	0,0064
0,127	0,002	0,052	0,271	0,0277	0,0013	0,0049
0,127	0,001	0,063	0,205	0,0314	0,0013	0,0062
0,127	0,002	0,038	0,226	0,0219	0,0007	0,0032
0,152	0,002	0,089	0,404	0,0418	0,0045	0,0111
0,152	0,010	0,111	0,960	0,0454	0,0136	0,0143
0,152	0,008	0,083	0,752	0,0399	0,0076	0,0101
0,152	0,003	0,068	0,433	0,0351	0,0034	0,0078
0,152	0,010	0,085	0,870	0,0405	0,0090	0,0104

**Fonte: Woodward & Yarnell (1920); Wilcox (1924) e Straub & Morris (1951)**

### Dados do escoamento em canal circular de Concreto (Continuação)

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da seção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Q <sub>obs</sub> (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )
0,152	0,010	0,065	0,769	0,0351	0,0056	0,0074
0,152	0,005	0,082	0,589	0,0399	0,0059	0,0100
0,152	0,001	0,091	0,269	0,0421	0,0030	0,0113
0,152	0,010	0,044	0,591	0,0253	0,0025	0,0043
0,152	0,008	0,065	0,619	0,0341	0,0045	0,0074
0,152	0,005	0,064	0,489	0,0338	0,0035	0,0073
0,203	0,005	0,076	0,648	0,0415	0,0072	0,0111
0,203	0,003	0,104	0,574	0,0512	0,0095	0,0167
0,203	0,010	0,069	0,860	0,0381	0,0082	0,0096
0,203	0,001	0,077	0,286	0,0418	0,0032	0,0113
0,203	0,001	0,095	0,316	0,0485	0,0046	0,0148
0,203	0,005	0,135	0,805	0,0585	0,0182	0,0229
0,203	0,015	0,126	1,372	0,0570	0,0287	0,0212
0,203	0,002	0,102	0,458	0,0506	0,0074	0,0163
0,203	0,013	0,099	1,137	0,0497	0,0176	0,0156
0,203	0,008	0,102	0,883	0,0506	0,0143	0,0163
0,203	0,040	0,152	2,321	0,0616	0,0606	0,0261
0,203	0,001	0,146	0,251	0,0600	0,0062	0,0250
0,203	0,015	0,052	0,871	0,0299	0,0057	0,0065
0,203	0,020	0,052	1,002	0,0299	0,0065	0,0065
0,203	0,015	0,050	0,857	0,0296	0,0053	0,0063
0,203	0,013	0,074	0,961	0,0405	0,0103	0,0108
0,203	0,015	0,098	1,197	0,0497	0,0185	0,0156
0,203	0,005	0,058	0,520	0,0332	0,0040	0,0076
0,203	0,010	0,047	0,651	0,0277	0,0036	0,0056
0,203	0,008	0,079	0,755	0,0427	0,0088	0,0117
0,203	0,005	0,097	0,675	0,0491	0,0102	0,0153
0,203	0,015	0,075	1,036	0,0408	0,0111	0,0108
0,203	0,030	0,104	1,703	0,0515	0,0283	0,0166
0,203	0,030	0,128	1,834	0,0579	0,0394	0,0215
0,203	0,013	0,050	0,744	0,0293	0,0045	0,0061
0,203	0,001	0,097	0,206	0,0491	0,0031	0,0153
0,203	0,005	0,082	0,604	0,0439	0,0074	0,0123
0,203	0,030	0,073	1,403	0,0402	0,0147	0,0105
0,203	0,040	0,128	2,063	0,0579	0,0445	0,0215
0,203	0,030	0,049	1,110	0,0290	0,0067	0,0060
0,203	0,003	0,080	0,455	0,0430	0,0054	0,0118
0,203	0,040	0,101	1,860	0,0506	0,0297	0,0160
0,203	0,001	0,079	0,177	0,0424	0,0020	0,0116

Fonte: Woodward & Yarnell (1920); Wilcox (1924) e Straub & Morris (1951)

### Dados do escoamento em canal circular de Concreto (Continuação)

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da secção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Q <sub>obs</sub> (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )
0,203	0,04	0,0762	1,575	0,0415	0,0176	0,0111
0,254	0,008	0,174	1,167	0,0744	0,0428	0,0369
0,254	0,003	0,133	0,672	0,0652	0,0179	0,0268
0,254	0,005	0,150	0,908	0,0698	0,0281	0,0311
0,254	0,001	0,168	0,293	0,0735	0,0104	0,0355
0,254	0,002	0,134	0,546	0,0655	0,0147	0,0271
0,254	0,002	0,131	0,539	0,0646	0,0141	0,0263
0,254	0,010	0,149	1,267	0,0695	0,0389	0,0309
0,254	0,010	0,169	1,313	0,0735	0,0466	0,0357
0,254	0,001	0,249	0,274	0,0674	0,0136	0,0504
0,254	0,008	0,165	1,130	0,0728	0,0391	0,0348
0,254	0,001	0,098	0,230	0,0530	0,0042	0,0181
0,254	0,010	0,123	1,157	0,0622	0,0281	0,0244
0,254	0,001	0,073	0,195	0,0421	0,0024	0,0121
0,254	0,013	0,096	1,140	0,0518	0,0198	0,0175
0,254	0,008	0,148	1,070	0,0695	0,0327	0,0307
0,254	0,002	0,105	0,470	0,0555	0,0092	0,0197
0,254	0,005	0,128	0,817	0,0637	0,0208	0,0256
0,254	0,013	0,065	0,909	0,0378	0,0092	0,0102
0,254	0,001	0,144	0,266	0,0683	0,0079	0,0298
0,254	0,005	0,103	0,728	0,0549	0,0140	0,0193
0,254	0,001	0,098	0,315	0,0530	0,0057	0,0181
0,254	0,003	0,103	0,557	0,0549	0,0107	0,0194
0,254	0,001	0,073	0,265	0,0418	0,0031	0,0119
0,254	0,008	0,124	0,928	0,0625	0,0228	0,0247
0,254	0,008	0,098	0,832	0,0530	0,0150	0,0181
0,254	0,010	0,100	0,962	0,0536	0,0177	0,0184
0,254	0,008	0,068	0,674	0,0396	0,0074	0,0110
0,254	0,005	0,070	0,552	0,0405	0,0063	0,0114
0,305	0,001	0,230	0,337	0,0914	0,0198	0,0592
0,305	0,001	0,111	0,255	0,0607	0,0061	0,0240
0,305	0,001	0,084	0,195	0,0485	0,0032	0,0163

Fonte: Woodward & Yarnell (1920); Wilcox (1924) e Straub & Morris (1951)

**Dados do escoamento em canal circular de Cerâmica para coeficiente de Manning sugerido pelo fabricante igual a 0,010**

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da secção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Qo (m³/s)	A (m²)
0,203	0,005	0,073	0,829	0,040	0,0091	0,0105
0,203	0,005	0,088	0,928	0,046	0,0133	0,0135
0,203	0,005	0,131	1,044	0,059	0,0231	0,0221
0,203	0,005	0,149	1,064	0,062	0,0272	0,0256
0,203	0,005	0,180	1,091	0,061	0,0331	0,0304
0,203	0,005	0,198	1,045	0,056	0,0328	0,0322
0,203	0,010	0,049	0,919	0,029	0,0055	0,0060
0,203	0,010	0,076	1,168	0,041	0,0130	0,0111
0,203	0,010	0,101	1,347	0,051	0,0215	0,0160
0,203	0,010	0,128	1,372	0,058	0,0294	0,0215
0,203	0,010	0,152	1,475	0,062	0,0385	0,0261
0,203	0,010	0,171	1,490	0,062	0,0433	0,0291
0,203	0,010	0,195	1,444	0,058	0,0464	0,0320
0,203	0,015	0,101	1,488	0,051	0,0238	0,0160
0,203	0,015	0,152	1,714	0,062	0,0442	0,0261
0,203	0,015	0,174	1,831	0,062	0,0541	0,0295
0,203	0,015	0,198	1,825	0,056	0,0583	0,0322
0,203	0,020	0,186	2,111	0,060	0,0657	0,0311

**Fonte: Woodward & Yarnell (1920)**

**Dados do escoamento em canal circular de Cerâmica para coeficiente de Manning sugerido pelo fabricante igual a 0,013**

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da secção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Qo (m³/s)	A (m²)
0,101	0,0005	0,101	0,1850	0,0285	0,00156	0,0081
0,101	0,0005	0,094	0,1978	0,0307	0,00159	0,0078
0,101	0,0010	0,100	0,2533	0,0292	0,00210	0,0081
0,101	0,0010	0,069	0,2676	0,0302	0,00161	0,0059
0,127	0,0010	0,124	0,3155	0,0357	0,00402	0,0126
0,127	0,0010	0,123	0,3057	0,0362	0,00388	0,0125
0,127	0,0010	0,107	0,3045	0,0389	0,00348	0,0114
0,127	0,0020	0,125	0,4225	0,0349	0,00541	0,0127
0,127	0,0020	0,125	0,4200	0,0351	0,00535	0,0126
0,127	0,0020	0,106	0,4545	0,0389	0,00518	0,0113
0,127	0,0020	0,096	0,4618	0,0386	0,00479	0,0103

**Fonte: Woodward & Yarnell (1920)**

**Dados do escoamento em canal circular de Cerâmica para coeficiente de Manning sugerido pelo fabricante igual a 0,013 (Continuação)**

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da seção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Qo (m³/s)	A (m²)
0,127	0,0020	0,085	0,4282	0,0372	0,00388	0,0090
0,127	0,0030	0,122	0,5410	0,0363	0,00682	0,0125
0,127	0,0030	0,119	0,5380	0,0372	0,00671	0,0124
0,127	0,0030	0,107	0,5438	0,0388	0,00626	0,0114
0,127	0,0050	0,121	0,6818	0,0367	0,00858	0,0125
0,127	0,0050	0,115	0,7215	0,0381	0,00878	0,0121
0,127	0,0050	0,106	0,7379	0,0389	0,00838	0,0113
0,127	0,0050	0,091	0,7154	0,0380	0,00697	0,0097
0,127	0,0150	0,120	1,2283	0,0370	0,01538	0,0124
0,127	0,0150	0,105	1,2771	0,0389	0,01436	0,0112
0,127	0,0150	0,097	1,2811	0,0387	0,01342	0,0104
0,127	0,0150	0,077	1,2536	0,0356	0,01014	0,0081
0,127	0,0150	0,064	1,1985	0,0319	0,00765	0,0064
0,127	0,0150	0,048	1,0717	0,0262	0,00473	0,0044
0,127	0,0150	0,036	0,9269	0,0207	0,00275	0,0030
0,152	0,0005	0,123	0,2438	0,0479	0,00396	0,0157
0,152	0,0020	0,152	0,5212	0,0447	0,01008	0,0182
0,152	0,0020	0,084	0,4782	0,0411	0,00510	0,0104
0,152	0,0050	0,152	0,8214	0,0447	0,01569	0,0182
0,152	0,0050	0,115	0,8205	0,0473	0,01257	0,0148
0,152	0,0050	0,084	0,7391	0,0411	0,00784	0,0103
0,152	0,0075	0,144	1,0266	0,0468	0,01926	0,0179
0,203	0,0005	0,202	0,2722	0,0582	0,00923	0,0324
0,254	0,0005	0,250	0,3560	0,0693	0,01809	0,0505
0,254	0,0005	0,247	0,3289	0,0708	0,01662	0,0503
0,254	0,0005	0,239	0,3292	0,0740	0,01634	0,0494
0,254	0,0005	0,228	0,3316	0,0761	0,01597	0,0480
0,254	0,0005	0,212	0,3478	0,0774	0,01580	0,0452
0,254	0,0005	0,203	0,3578	0,0775	0,01557	0,0434
0,254	0,0005	0,191	0,3709	0,0768	0,01521	0,0408
0,254	0,0005	0,166	0,3700	0,0735	0,01305	0,0352
0,254	0,0005	0,128	0,3386	0,0640	0,00872	0,0257
0,254	0,0010	0,238	0,5063	0,0741	0,02512	0,0494
0,254	0,0010	0,220	0,5340	0,0770	0,02503	0,0467
0,254	0,0010	0,208	0,5553	0,0775	0,02469	0,0443
0,254	0,0010	0,191	0,5538	0,0768	0,02265	0,0407
0,254	0,0010	0,174	0,5425	0,0750	0,02016	0,0371
0,254	0,0020	0,251	0,7065	0,0689	0,03591	0,0505
0,254	0,0020	0,243	0,7163	0,0727	0,03591	0,0499

**Fonte: Woodward & Yarnell (1920)**

**Dados do escoamento em canal circular de Cerâmica para coeficiente de Manning sugerido pelo fabricante igual a 0,013 (Continuação)**

<b>Diâmetro</b>	<b>Declividade</b>	<b>Profundidade Média</b>	<b>Velocidade</b>	<b>Raio hidráulico</b>	<b>Vazão observada</b>	<b>Área da seção transversal</b>
<b>D</b>	<b>S (m/m)</b>	<b>y (m)</b>	<b>V(m/s)</b>	<b>R (m)</b>	<b>Qo (m³/s)</b>	<b>A (m²)</b>
0,254	0,0020	0,237	0,7172	0,0744	0,03545	0,0492
0,254	0,0020	0,212	0,7696	0,0775	0,03483	0,0451
0,254	0,0020	0,203	0,7684	0,0775	0,03353	0,0435
0,254	0,0020	0,190	0,7910	0,0767	0,03222	0,0406
0,254	0,0020	0,172	0,7821	0,0745	0,02857	0,0364
0,254	0,0020	0,097	0,6108	0,0525	0,01087	0,0178
0,254	0,0020	0,062	0,4776	0,0365	0,00456	0,0095
0,254	0,0030	0,252	0,8513	0,0680	0,04332	0,0506
0,254	0,0030	0,248	0,8586	0,0705	0,04347	0,0503
0,254	0,0030	0,247	0,8605	0,0711	0,04347	0,0502
0,254	0,0030	0,245	0,8574	0,0719	0,04318	0,0501
0,254	0,0030	0,237	0,8678	0,0745	0,04287	0,0492
0,254	0,0030	0,230	0,8769	0,0757	0,04253	0,0483
0,254	0,0030	0,210	0,9421	0,0775	0,04236	0,0448
0,254	0,0030	0,208	0,9382	0,0775	0,04191	0,0445
0,254	0,0030	0,192	0,9574	0,0770	0,03953	0,0411
0,254	0,0030	0,172	0,9379	0,0745	0,03426	0,0364
0,254	0,0030	0,165	0,9098	0,0733	0,03183	0,0349
0,254	0,0030	0,148	0,8537	0,0694	0,02614	0,0305
0,254	0,0030	0,131	0,7958	0,0649	0,02110	0,0264
0,254	0,0030	0,100	0,6931	0,0538	0,01286	0,0185
0,254	0,0030	0,068	0,5596	0,0397	0,00614	0,0110
0,254	0,0050	0,244	1,1211	0,0723	0,05635	0,0500
0,254	0,0050	0,244	1,1098	0,0723	0,05578	0,0500
0,254	0,0050	0,229	1,1482	0,0760	0,05544	0,0481
0,254	0,0050	0,214	1,1969	0,0774	0,05465	0,0455
0,254	0,0050	0,200	1,1979	0,0775	0,05210	0,0427
0,254	0,0050	0,197	1,2021	0,0773	0,05091	0,0422
0,254	0,0050	0,188	1,1616	0,0766	0,04695	0,0403
0,254	0,0050	0,172	1,1351	0,0746	0,04163	0,0366
0,254	0,0050	0,163	1,1220	0,0728	0,03860	0,0343
0,254	0,0050	0,143	1,0531	0,0683	0,03109	0,0294
0,254	0,0050	0,130	1,0040	0,0645	0,02622	0,0261
0,254	0,0050	0,094	0,8848	0,0512	0,01504	0,0169
0,254	0,0050	0,065	0,7102	0,0380	0,00728	0,0102
0,254	0,0075	0,244	1,3439	0,0723	0,06754	0,0500
0,254	0,0075	0,243	1,3634	0,0728	0,06830	0,0498
0,254	0,0075	0,238	1,3564	0,0741	0,06728	0,0494
0,254	0,0075	0,228	1,3978	0,0761	0,06728	0,0479

**Fonte: Woodward & Yarnell (1920)**

**Dados do escoamento em canal circular de Cerâmica para coeficiente de Manning sugerido pelo fabricante igual a 0,013 (Continuação)**

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da seção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Qo (m³/s)	A (m²)
0,254	0,0075	0,221	1,4091	0,0769	0,06626	0,0468
0,254	0,0075	0,208	1,4323	0,0775	0,06397	0,0445
0,254	0,0075	0,197	1,4286	0,0773	0,06040	0,0421
0,254	0,0075	0,172	1,4045	0,0746	0,05140	0,0365
0,254	0,0075	0,165	1,3762	0,0732	0,04794	0,0347
0,254	0,0075	0,148	1,3183	0,0697	0,04063	0,0307
0,254	0,0075	0,125	1,2357	0,0628	0,03064	0,0247
0,254	0,0075	0,095	1,0552	0,0517	0,01824	0,0172
0,254	0,0100	0,247	1,5542	0,0713	0,07849	0,0502
0,254	0,0100	0,242	1,5636	0,0729	0,07830	0,0498
0,254	0,0100	0,227	1,5987	0,0764	0,07665	0,0477
0,254	0,0100	0,226	1,6298	0,0764	0,07790	0,0476
0,254	0,0100	0,216	1,6413	0,0773	0,07561	0,0459
0,254	0,0100	0,215	1,6346	0,0774	0,07501	0,0457
0,254	0,0100	0,206	1,6654	0,0776	0,07357	0,0440
0,254	0,0100	0,196	1,6880	0,0772	0,07093	0,0419
0,254	0,0100	0,176	1,6292	0,0752	0,06218	0,0374
0,254	0,0100	0,166	1,6145	0,0735	0,05686	0,0351
0,254	0,0100	0,146	1,5837	0,0698	0,04907	0,0302
0,254	0,0100	0,126	1,4527	0,0633	0,03659	0,0251
0,254	0,0100	0,091	1,2564	0,0501	0,02059	0,0163
0,254	0,0100	0,065	1,0662	0,0378	0,01085	0,0102
0,254	0,0125	0,250	1,7425	0,0697	0,08841	0,0504
0,254	0,0125	0,229	1,7803	0,0760	0,08603	0,0481
0,254	0,0125	0,212	1,8547	0,0774	0,08424	0,0452
0,254	0,0125	0,200	1,8727	0,0774	0,08050	0,0428
0,254	0,0125	0,194	1,8858	0,0771	0,07849	0,0415
0,254	0,0125	0,172	1,8629	0,0745	0,06805	0,0364
0,254	0,0125	0,161	1,8425	0,0724	0,06252	0,0338
0,254	0,0125	0,141	1,7630	0,0676	0,05083	0,0288
0,254	0,0125	0,127	1,6791	0,0637	0,04282	0,0254
0,254	0,0125	0,094	1,4618	0,0513	0,02492	0,0170
0,254	0,0125	0,063	1,2308	0,0372	0,01218	0,0099
0,254	0,0150	0,188	2,0022	0,0766	0,08093	0,0403
0,254	0,0150	0,170	1,9913	0,0742	0,07187	0,0360
0,254	0,0150	0,160	1,9839	0,0723	0,06703	0,0337
0,254	0,0150	0,139	1,8343	0,0672	0,05233	0,0284
0,254	0,0150	0,119	1,7029	0,0611	0,03998	0,0234
0,254	0,0150	0,091	1,5231	0,0503	0,02506	0,0164

**Fonte: Woodward & Yarnell (1920)**

**Dados do escoamento em canal circular de Cerâmica para coeficiente de Manning sugerido pelo fabricante igual a 0,013 (Continuação)**

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da secção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Qo (m³/s)	A (m²)
0,305	0,0005	0,301	0,3584	0,0751	0,02540	0,0728
0,305	0,0005	0,273	0,3767	0,0891	0,02551	0,0689
0,305	0,0005	0,261	0,3700	0,0907	0,02418	0,0665
0,305	0,0005	0,245	0,3837	0,0914	0,02373	0,0628
0,305	0,0005	0,212	0,3591	0,0891	0,01914	0,0540
0,305	0,0005	0,198	0,3709	0,0871	0,01841	0,0502
0,305	0,0005	0,170	0,3426	0,0809	0,01419	0,0419
0,305	0,0005	0,153	0,3325	0,0760	0,01206	0,0367

Fonte: Woodward & Yarnell (1920)

**Dados do escoamento em canal circular de PVC (Continuação)**

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da secção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Qo (m³/s)	A (m²)
0,203	0,003	0,067	0,667	0,0375	0,0063	0,0094
0,203	0,003	0,100	0,790	0,0509	0,0127	0,0160
0,203	0,003	0,121	0,869	0,0567	0,0176	0,0201
0,203	0,003	0,121	0,868	0,0567	0,0177	0,0202
0,203	0,003	0,164	0,945	0,0622	0,0268	0,0281
0,203	0,003	0,168	0,918	0,0625	0,0266	0,0287
0,203	0,003	0,170	0,906	0,0625	0,0266	0,0291
0,203	0,006	0,083	1,141	0,0442	0,0143	0,0124
0,203	0,006	0,052	0,865	0,0302	0,0056	0,0065
0,203	0,006	0,077	1,055	0,0415	0,0119	0,0112
0,203	0,006	0,102	1,208	0,0506	0,0198	0,0163
0,203	0,006	0,127	1,313	0,0576	0,0283	0,0214
0,203	0,006	0,158	1,382	0,0619	0,0378	0,0271
0,203	0,006	0,153	1,372	0,0613	0,0363	0,0262
0,203	0,011	0,142	1,706	0,0610	0,0418	0,0242
0,203	0,011	0,052	1,102	0,0305	0,0074	0,0066
0,203	0,011	0,070	1,310	0,0390	0,0132	0,0100
0,203	0,011	0,120	1,632	0,0561	0,0328	0,0200
0,203	0,011	0,065	1,252	0,0366	0,0112	0,0089
0,305	0,003	0,087	0,831	0,0506	0,0145	0,0171
0,305	0,003	0,110	0,960	0,0607	0,0232	0,0238
0,305	0,003	0,134	1,059	0,0701	0,0333	0,0308
0,305	0,006	0,065	0,975	0,0375	0,0113	0,0113
0,305	0,006	0,077	1,068	0,0451	0,0156	0,0144

Fonte: Neale & Price (1964)

### Dados do escoamento em canal circular de PVC (Continuação)

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da secção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Qo (m³/s)	A (m²)
0,305	0,006	0,102	1,273	0,0579	0,0278	0,0215
0,305	0,006	0,137	1,413	0,0710	0,0455	0,0317
0,305	0,006	0,154	1,518	0,0777	0,0570	0,0369
0,305	0,006	0,166	1,544	0,0811	0,0637	0,0406
0,305	0,006	0,169	1,538	0,0820	0,0647	0,0414
0,305	0,010	0,086	1,514	0,0494	0,0262	0,0170
0,305	0,010	0,103	1,620	0,0576	0,0355	0,0217
0,305	0,010	0,108	1,804	0,0600	0,0423	0,0231
0,305	0,010	0,111	1,757	0,0607	0,0429	0,0241
0,305	0,010	0,120	1,897	0,0646	0,0512	0,0266
0,305	0,010	0,159	1,978	0,0789	0,0778	0,0384
0,305	0,010	0,179	2,080	0,0850	0,0945	0,0446
0,305	0,010	0,200	2,365	0,0902	0,1224	0,0507

Fonte: Neale & Price (1964)

### Dados do escoamento em canal circular de cimento amianto

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da secção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Qo (m³/s)	A (m²)
0,38	0,001	0,089	0,2928	0,0528	0,0059	0,0203
0,38	0,001	0,090	0,2989	0,0529	0,0061	0,0204
0,38	0,001	0,098	0,3156	0,0573	0,0073	0,0232
0,38	0,001	0,103	0,3218	0,0595	0,0080	0,0247
0,38	0,001	0,105	0,3308	0,0606	0,0084	0,0255
0,38	0,001	0,114	0,3371	0,0648	0,0096	0,0285
0,38	0,001	0,119	0,3509	0,0671	0,0106	0,0303
0,38	0,001	0,125	0,3604	0,0701	0,0118	0,0326
0,38	0,001	0,128	0,3702	0,0715	0,0125	0,0337
0,38	0,001	0,128	0,3721	0,0713	0,0125	0,0336
0,38	0,001	0,139	0,3756	0,0759	0,0141	0,0374
0,38	0,001	0,140	0,3881	0,0765	0,0147	0,0379
0,38	0,001	0,149	0,3869	0,0803	0,0160	0,0414
0,38	0,001	0,153	0,3970	0,0818	0,0170	0,0428
0,38	0,001	0,161	0,4081	0,0847	0,0186	0,0456
0,38	0,001	0,073	0,3952	0,0444	0,0061	0,0153
0,38	0,001	0,086	0,4199	0,0508	0,0080	0,0191
0,38	0,001	0,094	0,4578	0,0552	0,0100	0,0218
0,38	0,001	0,103	0,4805	0,0597	0,0120	0,0249
0,38	0,001	0,111	0,5027	0,0637	0,0139	0,0277

Fonte: Kazempour & Apelt (1980)

### Dados do escoamento em canal circular de cimento amianto (continuação)

Diâmetro	Declividade	Profundidade Média	Velocidade	Raio hidráulico	Vazão observada	Área da secção transversal
D	S (m/m)	y (m)	V(m/s)	R (m)	Qo (m³/s)	A (m²)
0,38	0,001	0,121	0,5160	0,0684	0,0161	0,0312
0,38	0,001	0,128	0,5404	0,0715	0,0182	0,0337
0,38	0,001	0,134	0,5585	0,0740	0,0200	0,0358
0,38	0,001	0,141	0,5749	0,0768	0,0220	0,0382
0,38	0,001	0,147	0,5867	0,0795	0,0238	0,0406
0,38	0,001	0,155	0,5992	0,0827	0,0261	0,0436
0,38	0,001	0,160	0,6078	0,0845	0,0276	0,0454
0,38	0,001	0,062	0,4299	0,0381	0,0052	0,0120
0,38	0,001	0,076	0,4925	0,0457	0,0079	0,0161
0,38	0,001	0,088	0,5454	0,0523	0,0109	0,0200
0,38	0,001	0,100	0,5874	0,0582	0,0140	0,0238
0,38	0,001	0,109	0,6025	0,0626	0,0162	0,0269
0,38	0,001	0,119	0,6348	0,0673	0,0193	0,0304
0,38	0,001	0,128	0,6546	0,0714	0,0220	0,0336
0,38	0,001	0,135	0,6807	0,0743	0,0245	0,0360
0,38	0,001	0,145	0,7075	0,0784	0,0280	0,0396
0,38	0,001	0,155	0,7414	0,0825	0,0322	0,0434
0,38	0,001	0,161	0,7495	0,0849	0,0343	0,0458
0,38	0,002	0,060	0,5133	0,0372	0,0059	0,0116
0,38	0,002	0,078	0,5940	0,0467	0,0099	0,0167
0,38	0,002	0,092	0,6607	0,0542	0,0140	0,0212
0,38	0,002	0,105	0,6997	0,0607	0,0179	0,0256
0,38	0,002	0,118	0,7443	0,0666	0,0222	0,0298
0,38	0,002	0,128	0,7767	0,0713	0,0261	0,0336
0,38	0,002	0,136	0,8195	0,0750	0,0300	0,0366
0,38	0,002	0,148	0,8530	0,0798	0,0349	0,0409
0,38	0,002	0,159	0,8879	0,0842	0,0400	0,0451
0,38	0,003	0,056	0,5973	0,0347	0,0062	0,0104
0,38	0,003	0,071	0,6903	0,0433	0,0102	0,0148
0,38	0,003	0,086	0,7792	0,0508	0,0149	0,0191
0,38	0,003	0,097	0,8495	0,0568	0,0195	0,0229
0,38	0,003	0,107	0,8989	0,0615	0,0235	0,0261
0,38	0,003	0,118	0,9496	0,0668	0,0285	0,0300
0,38	0,003	0,128	1,0006	0,0712	0,0335	0,0334
0,38	0,003	0,137	1,0345	0,0751	0,0380	0,0367
0,38	0,003	0,146	1,0762	0,0788	0,0430	0,0399
0,38	0,004	0,050	0,6622	0,0313	0,0058	0,0088
0,38	0,004	0,071	0,8173	0,0430	0,0119	0,0146
0,38	0,004	0,085	0,9240	0,0506	0,0175	0,0189
0,38	0,004	0,098	1,0098	0,0574	0,0235	0,0233

Fonte: Kazemipour & Apelt (1980)

**Dados do escoamento em canal circular de cimento amianto (continuação)**

<b>Diâmetro</b>	<b>Declividade</b>	<b>Profundidade Média</b>	<b>Velocidade</b>	<b>Raio hidráulico</b>	<b>Vazão observada</b>	<b>Área da secção transversal</b>
<b>D</b>	<b>S (m/m)</b>	<b>y (m)</b>	<b>V(m/s)</b>	<b>R (m)</b>	<b>Qo (m³/s)</b>	<b>A (m²)</b>
0,38	0,004	0,109	1,0781	0,0626	0,0290	0,0269
0,38	0,004	0,118	1,1300	0,0669	0,0340	0,0301
0,38	0,004	0,129	1,1853	0,0716	0,0400	0,0337
0,38	0,004	0,139	1,2451	0,0762	0,0469	0,0377
0,38	0,005	0,039	0,6474	0,0247	0,0040	0,0061
0,38	0,005	0,046	0,7160	0,0289	0,0056	0,0078
0,38	0,005	0,066	0,8894	0,0401	0,0116	0,0130
0,38	0,005	0,080	1,0069	0,0478	0,0174	0,0173
0,38	0,005	0,091	1,1032	0,0536	0,0230	0,0208
0,38	0,005	0,103	1,1842	0,0598	0,0295	0,0249
0,38	0,005	0,111	1,2447	0,0637	0,0345	0,0277
0,38	0,005	0,124	1,3225	0,0695	0,0425	0,0321
0,38	0,005	0,131	1,3809	0,0727	0,0479	0,0347
0,38	0,006	0,036	0,6875	0,0231	0,0038	0,0055
0,38	0,006	0,061	0,9548	0,0374	0,0112	0,0117
0,38	0,006	0,075	1,0819	0,0453	0,0171	0,0158
0,38	0,006	0,089	1,1939	0,0528	0,0243	0,0203
0,38	0,006	0,105	1,3129	0,0602	0,0331	0,0252
0,38	0,006	0,117	1,4178	0,0663	0,0420	0,0296
0,38	0,006	0,127	1,4878	0,0710	0,0495	0,0333

**Fonte: Kazemipour & Apelt (1980)**

## ANEXO B

**Dados utilizados para o cálculo e comparação das vazões em canais naturais, extraídos do livro Open-Chanel Hydraulics, apresentados por French (1985).**

Nome	Número de Manning	Vazão observada	Área da seção transversal	Largura de topo	Prof. Média	Raio Hidráulico	Velocidade	Declividade
Rio	n	Qo (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	y (m)	R (m)	Vm (m/s)	S (m/m)
<i>Indian Fork</i>	0,026	21,75	25,36	15,54	1,65	1,47	0,86	0,000311
<i>Champlin Creek</i>	0,027	67,68	31,96	24,08	1,34	1,28	2,12	0,002443
<i>Clark Fork above Missoula</i>	0,030	891,98	337,61	89,61	3,77	3,69	2,64	0,001029
<i>Escopus Creek</i>	0,030	393,60	147,62	86,56	1,71	1,69	2,67	0,003397
<i>Salt Creek</i>	0,030	52,67	46,17	21,03	2,19	2,01	1,14	0,000545
<i>Blackfoot River</i>	0,031	232,20	105,91	57,61	1,84	1,82	2,19	0,002337
<i>Coeur d'Alene</i>	0,032	319,98	121,33	48,46	2,50	2,43	2,64	0,002200
<i>Coeur d'Alene</i>	0,032	319,98	121,89	56,39	2,16	2,09	2,62	0,003046
<i>Etowah rier</i>	0,035	14,58	21,83	16,15	1,34	1,23	0,67	0,000594
<i>Etowah rier</i>	0,035	14,58	20,35	16,76	1,22	1,09	0,72	0,000739
<i>Yakima River</i>	0,036	784,38	236,90	63,40	3,75	3,54	3,31	0,003056
<i>Wenatchee River</i>	0,037	642,79	229,47	69,49	3,29	3,22	2,80	0,002412
<i>Moyie River</i>	0,038	227,38	87,70	44,20	1,98	1,94	2,59	0,004735
<i>Spokane River</i>	0,038	1121,35	398,55	86,87	4,60	4,48	2,81	0,001828
<i>Etowah rier</i>	0,039	52,39	49,42	17,98	2,74	2,30	1,06	0,000699
<i>Tobesofkee Creek</i>	0,039	35,68	41,81	19,51	1,98	1,78	0,85	0,000667
<i>Middle Fork</i>	0,041	410,59	139,73	45,72	3,06	2,85	2,94	0,005505
<i>Middle Oconee</i>	0,041	88,91	87,33	35,36	2,47	2,35	1,02	0,000755
<i>Etowah Rier</i>	0,041	64,00	57,79	20,12	2,87	2,40	1,11	0,000837
<i>Tobesofkee Creek</i>	0,041	63,43	59,46	22,56	2,65	2,26	1,07	0,000920
<i>Tobesofkee Creek</i>	0,043	71,92	71,54	24,99	2,87	2,52	1,01	0,000768