

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

JAIDNA DANTAS DE ALMEIDA

**INVESTIGAÇÃO SOBRE AS VARIAÇÕES DO COEFICIENTE DE MANNING EM
FUNÇÃO DA ESTRUTURA DO ESCOAMENTO UNIFORME EM CANAIS**

João Pessoa - PB

2025

JAIDNA DANTAS DE ALMEIDA

**INVESTIGAÇÃO SOBRE AS VARIAÇÕES DO COEFICIENTE DE MANNING EM
FUNÇÃO DA ESTRUTURA DO ESCOAMENTO UNIFORME EM CANAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal
da Paraíba como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Engenheira Civil.

Orientador(a):

Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva

João Pessoa - PB

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A447i Almeida, Jaidna Dantas de.

INVESTIGAÇÃO SOBRE AS VARIAÇÕES DO COEFICIENTE DE
MANNING EM FUNÇÃO DA ESTRUTURA DO ESCOAMENTO UNIFORME
EM CANAIS / Jaidna Dantas de Almeida. - João Pessoa,
2025.

37 f. : il.

Orientação: Tarciso Cabral Silva.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Rugosidade. 2. Correntes secundárias. 3. Regimes
de Fluxo. I. Silva, Tarciso Cabral. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 66.01(043.2)

J Aidna Dantas de Almeida

INVESTIGAÇÃO SOBRE AS VARIAÇÕES DO COEFICIENTE DE MANNING EM FUNÇÃO DA ESTRUTURA DO ESCOAMENTO UNIFORME EM CANAIS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal
da Paraíba como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Engenheira Civil.

03 de Abril de 2025

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

TARCISO CABRAL DA SILVA

Data: 13/04/2025 11:41:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva – Orientador

UFPB



Documento assinado digitalmente

ALBANISE BARBOSA MARINHO

Data: 15/04/2025 08:17:32-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Albanise Barbosa Marinho – Membro Convidado

UFPB



Documento assinado digitalmente

DAVI DE CARVALHO DINIZ MELO

Data: 15/04/2025 10:33:07-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo – Membro Convidado

UFPB

João Pessoa – PB

2025

*Às minhas irmãs, Débora e Larissa, para
que acreditem sempre: vocês podem
conquistar tudo o que desejarem e
sonharem.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva, pela proposta do tema, orientação e disponibilidade de recursos para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Jair Almeida e Laédna Almeida, pelo suporte incondicional e incentivo aos estudos.

À minha tia Dinete Almeida, pelo acolhimento, apoio financeiro e emocional durante os seis anos em que morei em sua casa.

Ao meu esposo Nivaldo, pela compreensão, apoio e incentivo nos momentos mais desafiadores da graduação.

Aos meus colegas Nathalia Melo, Adriel Josef, Robert Araújo, Kamyla Rocha e Fábio da Silva, pelo companheirismo, ajuda acadêmica e pelos momentos de descontração que tornaram a jornada mais leve.

Agradeço a todos que contribuíram para a realização deste estudo, que busca avançar no entendimento da hidráulica de canais abertos.

RESUMO

Este trabalho investigou as variações do coeficiente de Manning (n) em função da estrutura do escoamento uniforme em canais abertos, considerando a influência da profundidade do escoamento e das correntes secundárias. A hipótese central é que o coeficiente de Manning não deve ser tratado como um valor fixo, mas sim como um parâmetro variável dependente das condições hidráulicas do escoamento. Para isso, foram analisados dados experimentais de diferentes seções de canais (triangulares, circulares e retangulares) e materiais de revestimento (areia, cimento amianto, aço, concreto, entre outros), extraídos da bibliografia relevante. Os resultados indicam que o coeficiente de Manning apresenta maior dispersão em escoamentos mais rasos, sugerindo uma influência significativa da rugosidade local e das correntes secundárias. Além disso, observou-se que a variação de n é mais pronunciada em canais com razão de aspecto elevada e em regimes de escoamento turbulento. Conclui-se que a abordagem tradicional de utilizar valores tabelados fixos para o coeficiente de Manning seria inadequada para representar a complexidade dos escoamentos reais, reforçando a necessidade de modelos que considerem a variabilidade desse parâmetro em função das condições hidráulicas.

Palavras-chave: Rugosidade, correntes secundárias, regimes de fluxo.

ABSTRACT

This study investigated the variations of Manning's coefficient (n) as a function of uniform flow structure in open channels, considering the influence of flow depth and secondary currents. The central hypothesis is that Manning's coefficient should not be treated as a fixed value but rather as a variable parameter dependent on the hydraulic conditions of the flow. To investigate this, experimental data from different channel sections (triangular, circular, and rectangular) and lining materials (sand, asbestos cement, steel, concrete, among others) were analyzed, sourced from relevant literature. The results indicate that Manning's coefficient exhibits greater dispersion in shallower flows, suggesting a significant influence of local roughness and secondary currents. Furthermore, variations in n were more pronounced in channels with high aspect ratios and under turbulent flow regimes. It is concluded that the traditional approach of using fixed tabulated values for Manning's coefficient may not adequately represent the complexity of real-world flows, reinforcing the need for models that account for the variability of this parameter based on hydraulic conditions.

Keywords: Roughness, secondary currents, flow regimes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exemplos de canais compostos.	6
Figura 2- Exemplo de escoamento em seção transversal de canal composto.	7
Figura 3- Diagrama Esquemático da Seção Transversal com Correntes Secundárias.	8
Figura 4- Comparação de Perfis de Velocidade.	9
Figura 5- Comportamento de n em função da profundidade para o canal A1T8.	16
Figura 6- Comportamento de n em função da profundidade para o canal A2T8.	17
Figura 7- Comportamento de n em função da profundidade para o canal A3T8.	18
Figura 8- Comportamento de n em função da profundidade para o canal A4T8.	19
Figura 9- Comportamento de n em função da profundidade para o canal A5T8.	20
Figura 10- Comportamento de n em função da profundidade para o canal A6T8. ..	21
Figura 11- Comportamento de n em função da profundidade para o canal AC9. ...	22
Figura 12- Comportamento de n em função da profundidade para o canal AR6. ...	23
Figura 13- Comportamento de n em função da profundidade para o canal CC135.	24
Figura 14- Comportamento de n em função da profundidade para o canal CEC24.	25
Figura 15- Comportamento de n em função da profundidade para o canal PC7.	26
Figura 16- Comportamento de n em função da profundidade para o canal VR10. .	27
Figura 17- Comportamento de n em função da profundidade para o canal VRE11.	28

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -- Equações para o Cálculo da Razão de Aspecto em Diferentes Tipos de Seção.	9
Quadro 2 -- Classificação do Regime de Escoamento.	9
Quadro 3 -- Características dos canais estudados.....	10
Quadro 4: Intervalos do Coeficiente de Manning (n) por Material.	34

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Razão de aspecto
b	Largura de topo
D	Diâmetro do canal
y	Profundidade média
θ	Ângulo central correspondente ao nível de enchimento do canal
v	Velocidade média
g	Aceleração da gravidade
ν	Viscosidade cinemática
n	Coeficiente de Manning
R_h	Raio hidráulico
i	Declividade do canal
Re	Número de Reynolds
Fr	Número de Froude

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	Hipóteses	13
1.1.1.	Hipótese principal:	13
1.1.2.	Hipóteses secundárias:	13
1.2.	Objetivos	13
1.2.1.	Objetivo geral:.....	13
1.2.2.	Objetivos específicos:.....	14
1.3.	Estrutura do trabalho.....	14
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1.	Escoamentos em Canais	16
2.2.	Equação de Chézy: Contexto, Aplicações e Limitações	16
2.3.	Coeficiente de Manning: Histórico, Aplicações e Limitações	17
2.4.	Canais com Seções Compostas e as Correntes Secundárias	18
2.5.	Correntes Secundárias ou de Circulação	20
3.	METODOLOGIA	24
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5.	CONCLUSÕES	35
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

A hidráulica de canais abertos é uma área fundamental da engenharia hidráulica, responsável pelo estudo dos escoamentos cuja superfície livre está em contato com a atmosfera. Esses escoamentos ocorrem em canais naturais, como rios e riachos, e em canais artificiais, como os de sistemas de drenagem e irrigação. A correta modelagem desses escoamentos é essencial para diversas aplicações, incluindo projetos de infraestrutura hidráulica, previsão de enchentes e otimização de sistemas de transporte de água (Chow, 1959; Porto, 2006).

Dentre os principais desafios da hidráulica de canais, destaca-se a determinação precisa do coeficiente de Manning (n), que representa a resistência ao escoamento causada pela rugosidade das superfícies do canal. Esse coeficiente é utilizado na equação de Manning, uma das expressões mais empregadas para estimar a velocidade e a vazão em canais abertos. No entanto, a formulação tradicional da equação assume que n é constante para um determinado material do perímetro do canal, desconsiderando variações que podem ocorrer devido a fatores como profundidade do escoamento, geometria da seção e presença de correntes secundárias (Manning, 1891; Nezu; Nakagawa, 1993).

Estudos recentes indicam que o coeficiente de Manning pode não ser fixo, mas sim variável em função das condições do escoamento. A interação entre a profundidade do escoamento e a rugosidade do canal pode levar a flutuações significativas nos valores de n , tornando inadequada a utilização de valores tabelados fixos para previsões hidráulicas (Costa; Costa; Castro, 2024). Além disso, a influência das correntes secundárias — movimentos transversais e circulares que ocorrem no plano perpendicular ao escoamento principal — também pode impactar a distribuição da velocidade e as tensões de cisalhamento na seção do canal, afetando diretamente o valor de n (Stoesser; McSherry; Fraga, 2015).

Diante desse contexto, este estudo busca investigar a variação do coeficiente de Manning em função da profundidade do escoamento e da presença de correntes secundárias. A hipótese central do trabalho é que o coeficiente de Manning não deve ser tratado como um valor fixo, mas sim como um parâmetro variável dependente das condições hidráulicas do escoamento. Para isso, serão analisadas diferentes seções

de canais, levando em conta suas características geométricas, os números de Reynolds e de Froude, e a influência das correntes secundárias. Com base nessa análise, pretende-se propor uma abordagem mais precisa para a consideração do coeficiente de Manning em modelos hidráulicos. A compreensão da variação do coeficiente de Manning é crucial para projetos de infraestrutura hidráulica, como sistemas de drenagem urbana e canais de irrigação, onde variações locais de profundidade e rugosidade são frequentes.

A importância desse estudo reside no fato de que uma modelagem mais fidedigna e robusta para coeficiente de Manning pode contribuir para previsões mais precisas de escoamentos em canais abertos, impactando diretamente o planejamento e a operação de sistemas hidráulicos. Além disso, a consideração da influência das correntes secundárias pode fornecer uma nova perspectiva para o aprimoramento dos modelos convencionais, permitindo ajustes que melhor representem a complexidade dos escoamentos naturais e artificiais

1.1. Hipóteses

Este trabalho parte das seguintes premissas:

1.1.1. Hipótese principal: O coeficiente de Manning varia de forma sistemática com as condições hidráulicas, especialmente em canais de dimensões não convencionais ou sob regimes de escoamento específicos.

1.1.2. Hipóteses secundárias:

- Escoamentos turbulentos ($Re > 2100$) mostram maior variação de n ;
- Materiais com rugosidade heterogênea (como areia) amplificam a sensibilidade de n à profundidade.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral:

Compreender a variabilidade do coeficiente de Manning em escoamentos uniformes, integrando efeitos de profundidade e correntes secundárias.

1.2.2. Objetivos específicos:

- Quantificar a relação entre n e a profundidade do escoamento em diferentes seções (triangular, circular, retangular);
- Identificar padrões de dispersão de n associados a correntes secundárias, usando parâmetros como razão de aspecto (α) e número de Froude (Fr).

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos que abordam progressivamente a investigação sobre o comportamento do coeficiente de Manning em escoamentos uniformes. O primeiro capítulo estabelece o contexto da pesquisa, apresentando a relevância do coeficiente de Manning para projetos de engenharia hidráulica e delimitando o problema de estudo relacionado à sua variação em diferentes condições de escoamento.

O desenvolvimento teórico é apresentado no segundo capítulo, que examina as formulações clássicas e contemporâneas sobre resistência ao escoamento em canais abertos, com ênfase nos mecanismos hidrodinâmicos que influenciam o comportamento do coeficiente de Manning. Esta fundamentação fornece o suporte conceitual necessário para a análise dos resultados.

A abordagem metodológica é detalhada no terceiro capítulo, descrevendo os procedimentos experimentais adotados, incluindo a caracterização dos canais estudados, os parâmetros hidráulicos considerados e as técnicas de análise empregadas. Esta seção estabelece as bases para a compreensão dos resultados obtidos.

Os achados da pesquisa são apresentados e discutidos no quarto capítulo, que analisa sistematicamente os dados experimentais, estabelecendo relações entre as variáveis estudadas e discutindo suas implicações práticas. Esta análise é conduzida à luz do referencial teórico apresentado anteriormente.

Por fim, o quinto capítulo sintetiza as principais conclusões do estudo, avaliando os resultados em relação aos objetivos propostos e apontando direções para pesquisas futuras que possam aprofundar a compreensão do tema investigado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Escoamentos em Canais

A hidráulica de canais abertos se refere ao estudo dos escoamentos cuja superfície livre está em contato direto com a atmosfera ou sob pressão atmosférica. Esses canais podem ser naturais, como rios e riachos, ou artificiais, como canais de irrigação e de drenagem. A compreensão dos escoamentos em canais é essencial para o dimensionamento e a gestão de sistemas hidráulicos, influenciando diretamente áreas como irrigação, controle de enchentes e navegação fluvial (Chow, 1959). O comportamento dos escoamentos em canais abertos é influenciado por diversos fatores, incluindo a geometria do canal, a rugosidade das superfícies, a declividade longitudinal e a presença de vegetação. Esses fatores afetam a distribuição de velocidades, as tensões de cisalhamento e a capacidade de transporte de sedimentos, tornando-se fundamentais na análise e no projeto de obras hidráulicas (Nezu; Nakagawa, 1993).

Os escoamentos em canais abertos são caracterizados por parâmetros hidráulicos fundamentais, como profundidade, raio hidráulico, perímetro molhado e declividade do canal. A profundidade hidráulica é crucial na determinação do regime de escoamento, que pode ser classificado como subcrítico, crítico ou supercrítico, afetando diretamente a velocidade e a capacidade de transporte de sedimentos (Nezu; Nakagawa, 1993). O raio hidráulico, definido como a razão entre a área da seção transversal do escoamento e o perímetro molhado, é outro parâmetro essencial na análise de escoamentos em canais. Ele influencia a resistência ao escoamento e, consequentemente, a perda de carga ao longo do canal (Porto, 2006). A declividade do canal, ou seja, a inclinação longitudinal do fundo, afeta diretamente a energia disponível para o escoamento. Canais com maior declividade tendem a apresentar velocidades mais altas, enquanto canais com menor declividade podem ter escoamentos mais lentos e suscetíveis à deposição de sedimentos (Chow, 1959).

2.2. Equação de Chézy: Contexto, Aplicações e Limitações

A equação de Chézy (1), desenvolvida por Antoine de Chézy em 1769, é uma das fórmulas pioneiras na hidráulica de canais abertos. Ela relaciona a velocidade

média do escoamento (v) ao coeficiente de Chézy (C), ao raio hidráulico (Rh) e à declividade do canal (i).

$$v = C \cdot \sqrt{Rh \cdot i} \quad (1)$$

Apesar de ser amplamente utilizada, a determinação precisa do coeficiente C é complexa, pois ele depende de fatores como rugosidade da superfície e condições particulares do escoamento (Chow, 1959). O coeficiente de Chézy não possui uma fórmula universal para sua determinação, sendo frequentemente obtido por meio de tabelas ou correlações empíricas baseadas em características do canal, como material das paredes e condições de escoamento. Essa dependência de dados empíricos limita a aplicabilidade direta da equação de Chézy em situações onde essas informações não estão disponíveis (Porto, 2006).

Apesar dessas limitações, a equação de Chézy estabeleceu as bases para o desenvolvimento de outras fórmulas de resistência ao escoamento em canais abertos, influenciando significativamente a engenharia hidráulica e o entendimento dos fenômenos associados ao escoamento em canais (Chow, 1959).

2.3. Coeficiente de Manning: Histórico, Aplicações e Limitações

Em 1891, Robert Manning propôs uma fórmula (2) que aprimorou a equação de Chézy ao introduzir um coeficiente empírico de rugosidade (n), conhecido como coeficiente de Manning.

$$v = \frac{1}{n} \cdot Rh^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{i} \quad (2)$$

Onde,

n : Coeficiente de Manning;

Rh : Raio hidráulico (m);

i : Declividade do canal (m/m) .

O coeficiente n considera características da superfície do canal, como material, vegetação e irregularidades. No entanto, a fórmula de Manning assume escoamento uniforme e não considera fenômenos tridimensionais, como correntes secundárias, o que pode limitar sua precisão em determinadas situações (Castro, 2024).

A praticidade da fórmula de Manning contribuiu para sua ampla adoção na engenharia hidráulica. No entanto, a precisão dos resultados obtidos depende da escolha adequada do coeficiente de rugosidade n , que varia conforme as condições específicas do canal e do escoamento (Chow, 1959).

Diversas tabelas e estudos empíricos foram desenvolvidos para auxiliar na seleção do coeficiente de Manning adequado para diferentes condições de escoamento e tipos de canais. Entretanto, a variabilidade inerente às condições naturais e a presença de fatores não contemplados na fórmula original podem introduzir incertezas nas estimativas de velocidade e vazão (Porto, 2006).

Embora amplamente utilizada, a fórmula de Manning baseia-se em pressupostos que simplificam a realidade dos escoamentos. Entre tais pressupostos, destaca-se a hipótese de que o escoamento é uniforme. Essa simplificação desconsidera fenômenos relevantes, como as correntes secundárias, que podem alterar a distribuição de velocidade e as tensões de cisalhamento ao longo da seção do canal (Cabral da Silva, 1992).

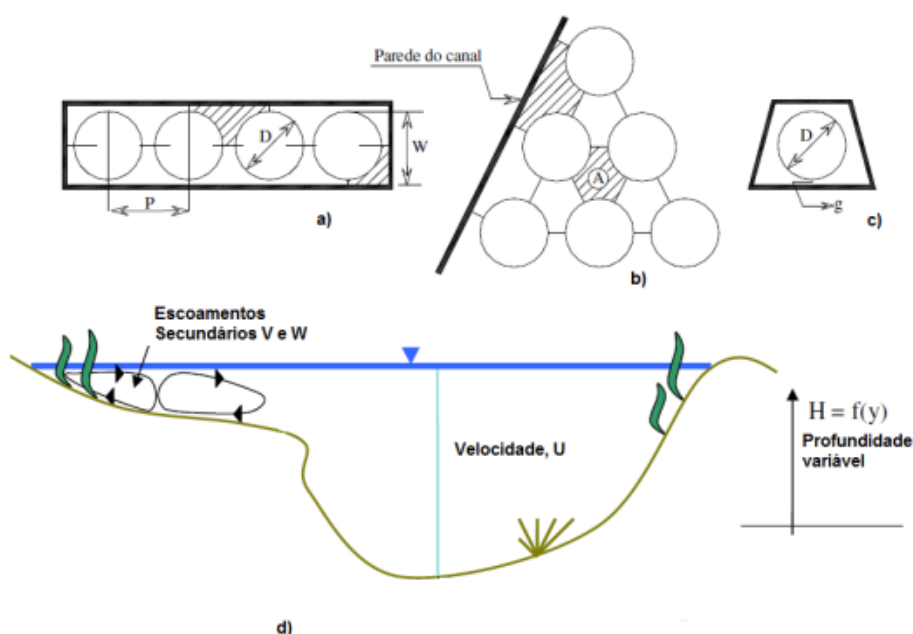
2.4. Canais com Seções Compostas e as Correntes Secundárias

Canais compostos são caracterizados por uma seção transversal que combina um leito principal mais profundo com áreas laterais rasas, como zonas de inundação ou bancos de sedimentos. Essas configurações são comuns em rios, canais de irrigação e planícies aluviais, onde a presença de subcanais ou fendas conectadas ao canal principal influencia significativamente o comportamento do escoamento (Nezu e Nakagawa, 1993; Shiono e Knight, 1991). A geometria composta desses canais gera gradientes de velocidade e tensão de cisalhamento, que, por sua vez, intensificam a formação de correntes secundárias e estruturas turbulentas complexas. Em canais compostos, a interação entre o leito principal e as regiões laterais promove a

transferência de momento e massa, resultando em padrões de circulação que afetam a distribuição de velocidades e a resistência ao escoamento.

A Figura 1 ilustra diferentes tipos de canais compostos, destacando a presença de subcanais ou fendas que conectam o leito principal às áreas laterais. Essas fendas são responsáveis pela formação de vórtices de eixo vertical, que surgem devido às diferenças de velocidade entre o leito principal e as regiões laterais (Prooijen et al., 2005).

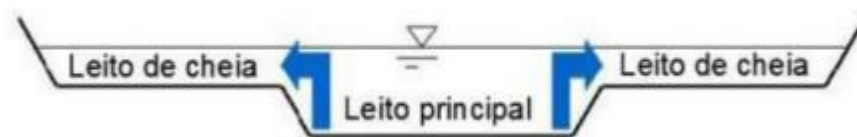
Figura 1: Exemplos de canais compostos.



Fonte: Xavier (2013), adaptado de Goulart (2009).

A Figura 2 mostra um exemplo de escoamento em um canal composto, onde o leito principal (LP) é conectado a leitos de cheia (LC) adjacentes. Em situações de cheia, o aumento do nível da água faz com que o escoamento se expanda para as áreas laterais, alterando as características do fluxo e gerando uma camada de mistura entre as regiões de diferentes velocidades (Nezu, 1994).

Figura 2: Exemplo de escoamento em seção transversal de canal composto.



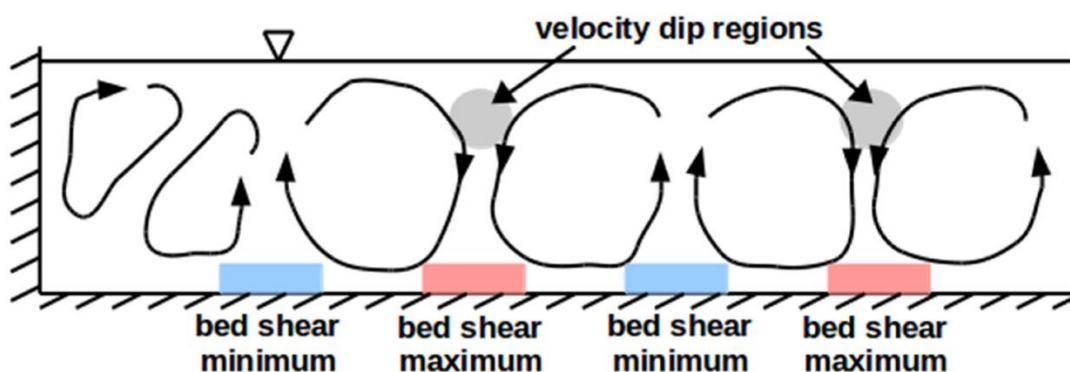
Fonte: Xavier (2013), adaptado de Nezu (1994).

2.5. Correntes Secundárias ou de Circulação

As correntes secundárias são movimentos circulares que se desenvolvem no plano transversal do canal, decorrentes da interação entre a turbulência e a geometria da seção. Essas correntes geram zonas de recirculação que podem modificar tanto o perfil de velocidade quanto as tensões de cisalhamento, aspectos fundamentais para a compreensão dos escoamentos em canais. Essas correntes são relevantes em canais curvos, onde a força centrífuga provoca uma redistribuição das velocidades, criando zonas de recirculação que afetam a distribuição de sedimentos e a morfologia do leito (Stoesser; McSherry; Fraga, 2015).

A Figura 3 ilustra a organização das correntes secundárias em um canal aberto, conforme observado por Stoesser, McSherry e Fraga (2015). Esses movimentos circulares, representados por setas curvas no plano transversal, surgem devido à anisotropia da turbulência (Prandtl, 1926) e à interação entre o escoamento principal e a rugosidade não uniforme do leito.

Figura 3 – Diagrama Esquemático da Seção Transversal com Correntes Secundárias



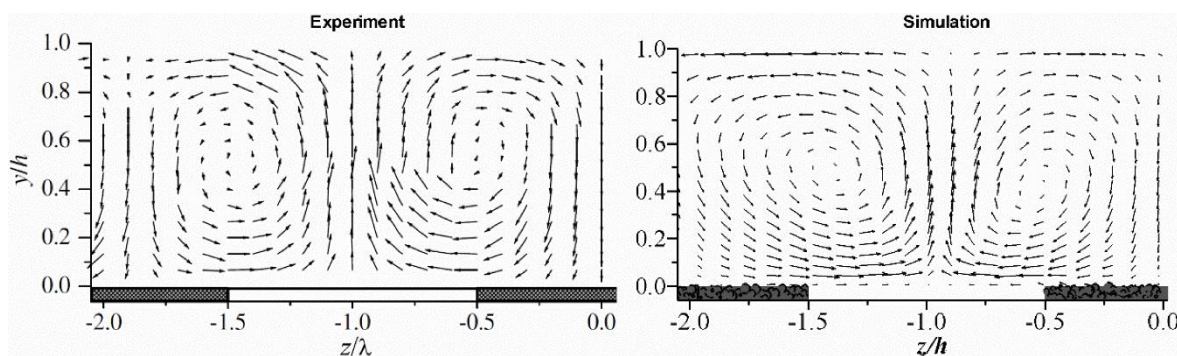
Fonte: Stoesser, T., McSherry, R. e Fraga, B. (2015)

O diagrama destaca dois fenômenos críticos:

- **Padrão de Circulação:** As correntes secundárias transportam fluido em alta velocidade (*downflow*) para as regiões próximas ao leito sobre faixas rugosas, criando máximos locais de tensão de cisalhamento (*bed shear maximum*). Simultaneamente, fluido de baixa velocidade (*upflow*) é direcionado para a superfície sobre faixas lisas, resultando em mínimos de tensão (*bed shear minimum*).
- **Regiões de Redução de Velocidade:** As zonas marcadas como *velocity dip regions* correspondem a áreas onde a velocidade média do escoamento é reduzida devido ao transporte vertical de quantidade de movimento. Essas regiões são particularmente relevantes em canais estreitos ($\alpha \leq 5$), onde a dispersão do coeficiente de Manning (n) se torna mais pronunciada.

A Figura 4 compara perfis de velocidade obtidos experimentalmente e via simulação numérica, destacando o impacto das correntes secundárias na hidrodinâmica do canal. No perfil influenciado por correntes secundárias (linha "Simulation"), observa-se uma clara divergência do perfil idealizado, com desvios acentuados próximos ao leito e à superfície livre. Essa distorção é causada pela concentração de altas velocidades sobre as faixas rugosas (*downflow*) e reduz a velocidade sobre as faixas lisas (*upflow*).

Figura 4 – Comparação de Perfis de Velocidade



Fonte: Stoesser, T., McSherry, R. e Fraga, B. (2015)

Essas figuras reforçam a ideia de que a aplicação da fórmula de Manning – que assume um escoamento uniformemente distribuído – pode não ser adequada para canais onde as correntes secundárias exercem um papel significativo. Essa evidência visual apoia a necessidade de se considerar os efeitos das correntes secundárias na modelagem dos escoamentos, principalmente no que diz respeito à estimativa das velocidades e das perdas de carga.

A ação das correntes secundárias impacta diretamente a distribuição da velocidade ao longo da seção do canal. Em vez do perfil idealizado de escoamento uniforme, observa-se que a presença de recirculações cria regiões com velocidades diferenciadas, o que pode levar a discrepâncias significativas na estimativa da velocidade média do fluxo. Do ponto de vista físico, a formação das correntes secundárias está associada aos gradientes de velocidade que surgem na interface entre a água e as superfícies do canal. Esse mecanismo resulta em uma redistribuição da energia turbulenta, levando à criação de vórtices que, em determinadas regiões, podem intensificar ou atenuar as tensões de cisalhamento.

Conforme evidenciado por Cabral da Silva (1992), a presença dessas correntes resulta numa não uniformidade no escoamento, gerando variações locais na intensidade do cisalhamento. Essa observação reforça a ideia de que os modelos hidráulicos convencionais, que não levam em conta tais perturbações, podem apresentar limitações na previsão precisa dos parâmetros de escoamento. Além disso, essa redistribuição da velocidade provoca uma variação na distribuição das tensões de cisalhamento ao longo do perímetro molhado do canal. Regiões próximas às paredes, onde se concentram os efeitos da recirculação, tendem a apresentar tensões mais elevadas, alterando a forma como a energia é dissipada ao longo do escoamento.

Dessa forma, ao desconsiderar os efeitos das correntes secundárias, a fórmula de Manning – baseada na hipótese de uniformidade – pode não refletir com exatidão a complexidade real do escoamento. Estudos recentes, como os de Costa, Costa e Castro (2024), evidenciam que a inclusão desses efeitos é essencial para uma modelagem mais robusta e precisa. A fórmula de Manning, apesar de sua eficácia em muitos contextos, foi originalmente deduzida para canais de pequenas dimensões e

escoamentos que se aproximam do estado uniforme. Essa característica implica que, para escoamentos com intensas perturbações internas – como aquelas promovidas pelas correntes secundárias – a aplicação direta da fórmula pode levar a resultados imprecisos.

Portanto, há uma necessidade crescente de revisar ou ajustar o modelo de Manning, de modo a incorporar parâmetros que representem a influência das correntes secundárias. Essa abordagem permitirá um melhor entendimento das perdas de carga e uma estimativa mais acurada da velocidade média, contribuindo para o aprimoramento dos modelos hidráulicos atuais. Assim, o reconhecimento das correntes secundárias e de sua influência sobre a distribuição da velocidade e as tensões de cisalhamento revela uma limitação importante na aplicação da fórmula de Manning. A integração desses efeitos no cálculo hidráulico representa um avanço fundamental para a obtenção de resultados mais fiéis à realidade dos escoamentos em canais, justificando a investigação proposta neste trabalho.

3. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foram utilizados dados experimentais extraídos da dissertação de mestrado de Cícero de Souza Nogueira Neto (2020), intitulada *Avaliação de Equações para Cálculo do Escoamento Uniforme em Canais Lisos e Rugosos*, desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Essa dissertação reúne um conjunto abrangente de dados experimentais, incluindo medições detalhadas de vazão e velocidade em diferentes tipos de canais, seções transversais (retangulares, circulares e triangulares) e materiais de revestimento.

A análise foi conduzida a partir de cálculos complementares para caracterizar as condições do escoamento em cada medição. Um dos principais parâmetros avaliados foi a razão de aspecto (α), que influencia diretamente a distribuição da velocidade e das tensões de cisalhamento na seção transversal do canal. Como diferentes geometrias apresentam padrões distintos de escoamento, foram utilizadas abordagens diferentes para cada tipo de seção. As fórmulas empregadas para o cálculo da razão de aspecto estão apresentadas no Quadro 1.

Desta forma, de acordo com Cabral da Silva (1992) a partir da razão de aspecto, classificaram-se os canais retangulares e trapezoidais de acordo com a seguinte relação:

- Para $\frac{b}{y} \leq 5$, o canal é classificado como estreito;
- Para $\frac{b}{y} > 5$, o canal é classificado como largo.

Quadro 1: Equações para o Cálculo de α em Diferentes Tipos de Seção

<i>Tipo de Seção</i>	<i>Equação para Razão de Aspecto</i>	<i>Referência Bibliográfica</i>
<i>Retangular</i>	$\alpha = \frac{b}{y}$	Cheng et al. (2011)
<i>Circular</i>	$\alpha = \frac{D \sin \theta}{2 \cdot (1 - \cos \theta)}$	Ba Tuyen & Cheng (2012)
<i>Triangular</i>	$\alpha = \frac{b}{2y}$	Pimenta (1966)

Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2011), Ba, Tuyen & Cheng (2012) e Pimenta (1966).

Onde,

α : Razão de aspecto;

b: largura de topo (m);

D: diâmetro do canal (m);

y: profundidade média (m);

θ : ângulo central correspondente ao nível de enchimento do canal.

Além disso, os regimes de escoamento foram classificados com base nos números de Reynolds (Re) e Froude (Fr), conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Classificação do Regime de Escoamento

<i>Equação</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Classificação</i>
$Re = \frac{vD}{\nu}$	Re<2100	Laminar
	Re>2100	Turbulento
$Fr = \frac{V}{g \cdot y}$	Fr<1	Subcrítico
	Fr=1	Crítico
	Fr>1	Supercrítico

Fonte: Adaptado de White (2011).

Onde,

v: velocidade média (m/s);

g: aceleração da gravidade (m/s²);

ν : viscosidade cinemática (m²/s).

Os coeficientes de Manning foram calculados para cada medição e relacionados aos parâmetros hidráulicos, permitindo a obtenção de curvas que evidenciam a variação de n com a profundidade. Essas análises possibilitaram:

- Demonstrar a correlação entre profundidade e coeficiente de Manning (n), evidenciando sua variação para diferentes condições experimentais.
- Identificar as faixas de profundidade onde há maior dispersão dos valores de n e verificar se essas regiões coincidem com aquelas de maior influência das correntes secundárias.
- Comparar os resultados obtidos com valores tabelados na literatura e avaliar a necessidade de ajustes nos modelos tradicionais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Quadro 3 apresenta a organização dos canais estudados de acordo com suas características principais, incluindo o material do revestimento, o tipo de seção transversal e a classificação do canal. Esses parâmetros foram extraídos das medições disponíveis, enquanto a classificação dos canais foi realizada com base nos critérios estabelecidos nesta pesquisa. Essa categorização permite uma visão geral das diferenças entre os canais, auxiliando na análise do comportamento do coeficiente de Manning.

Quadro 3: Características dos canais estudados

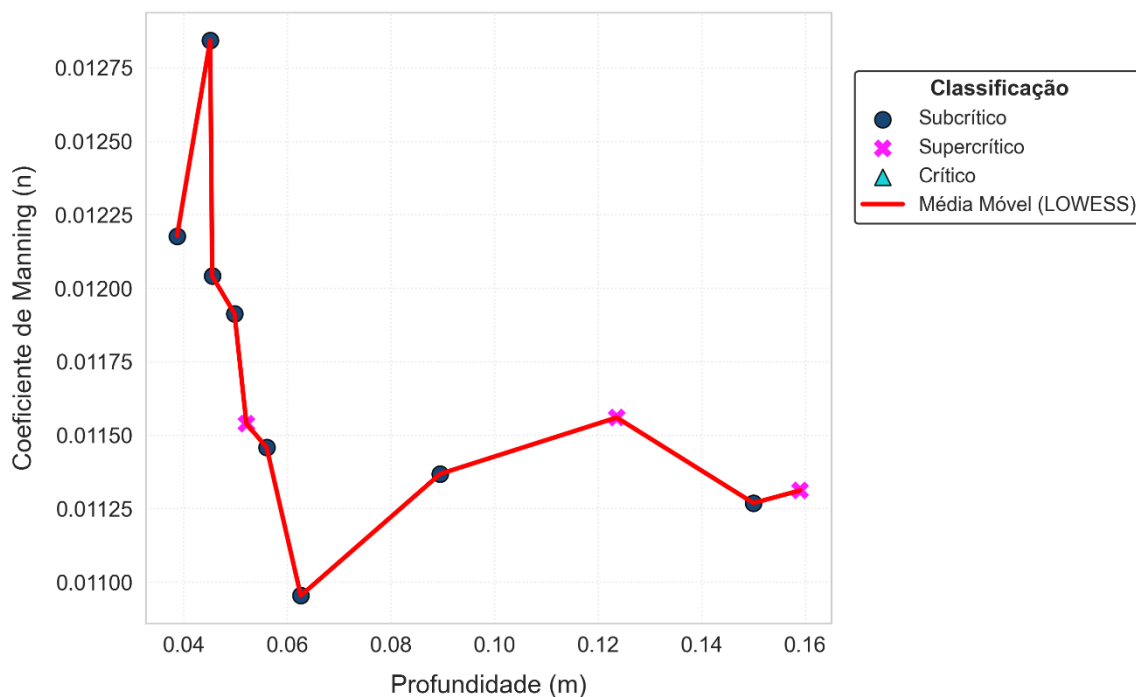
<i>ID</i>	<i>Material</i>	<i>Tipo da Seção</i>	<i>Diâmetro (m)</i>	<i>Classificação do Canal</i>
A1T8	Revestimento de Areia	Triangular	0,1586	Estreito
A2T8	Revestimento de Areia	Triangular	0,2246	Estreito
A3T8	Revestimento de Areia	Triangular	0,1686	Estreito
A4T8	Revestimento de Areia	Triangular	0,1586	Estreito
A5T8	Revestimento de Areia	Triangular	0,2026	Estreito
A6T8	Revestimento de Areia	Triangular	0,2136	Estreito
AC9	Cimento Amianto	Circular	0,38	Estreito
AR6	Aço	Retangular	1,0668	Estreito
CC135	Concreto	Circular	0,2033	Estreito
CEC24	Cerâmico	Circular	0,2539	Estreito
PC7	PVC	Circular	0,254	Estreito
VR10	Vidro	Retangular	0,3375	Estreito
VRE11	Vidro	Retangular	0,00945	Estreito

Fonte: Dados da autora, adaptado de Nogueira Neto (2020).

Os resultados obtidos a partir das medições permitiram analisar a relação entre a profundidade do escoamento e a variação do coeficiente de Manning para diferentes seções de canais.

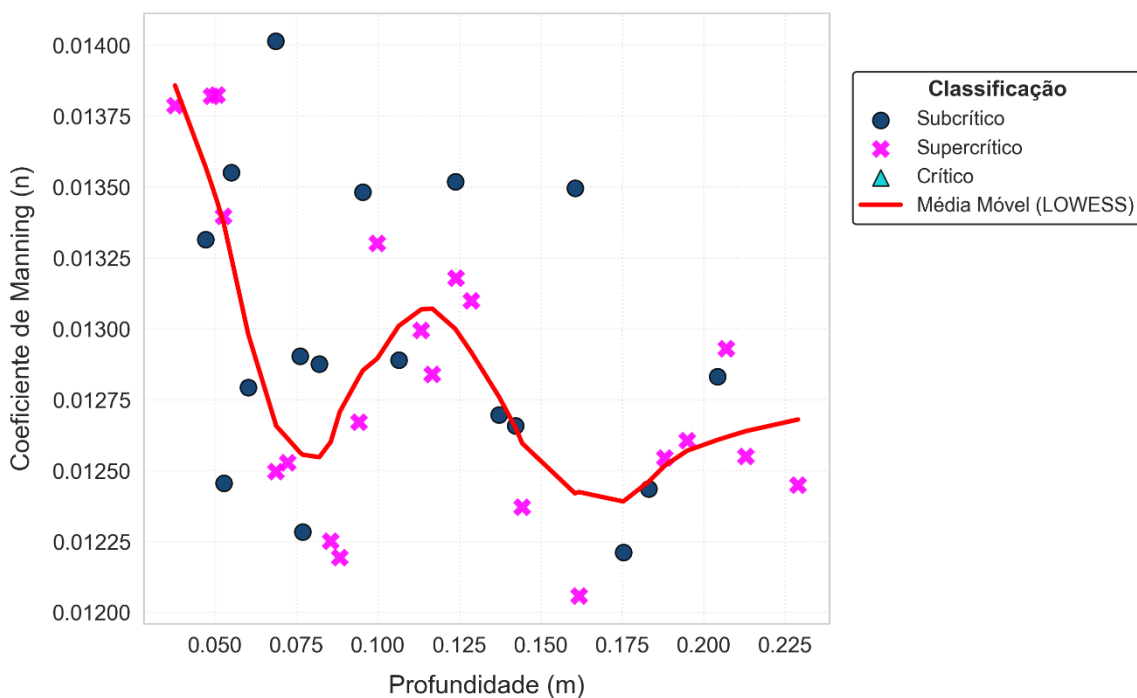
As Figuras 5 a 17 apresentam a distribuição dos valores do coeficiente de Manning (n) em função da profundidade do escoamento para diferentes materiais de revestimento e seções de canais. Em cada gráfico, os pontos representam os valores experimentais de n , enquanto a linha vermelha indica a média móvel desses valores, calculada para suavizar as flutuações locais e destacar a tendência geral do comportamento do coeficiente n . Essa abordagem permite identificar padrões e variações sistemáticas em n , que podem estar associadas a fatores como a rugosidade do material, a geometria da seção e a presença de correntes secundárias.

Figura 5: Comportamento de n em função da profundidade para o canal A1T8.



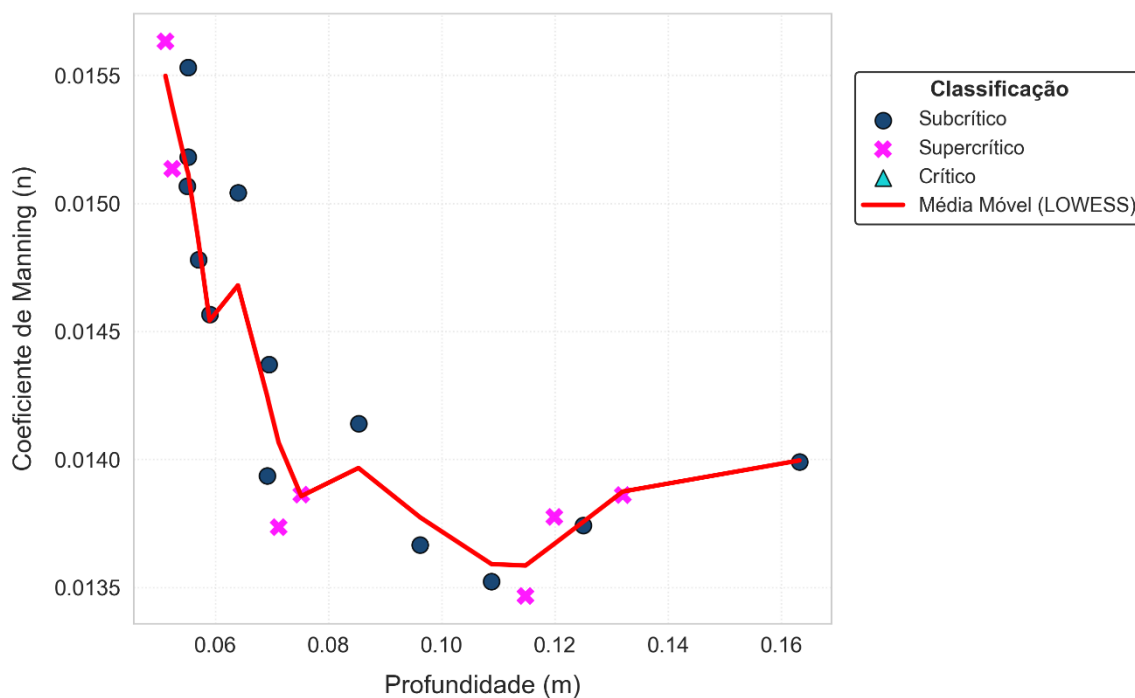
Fonte: Autora (2025).

Figura 6: Comportamento de n em função da profundidade para o canal A2T8.



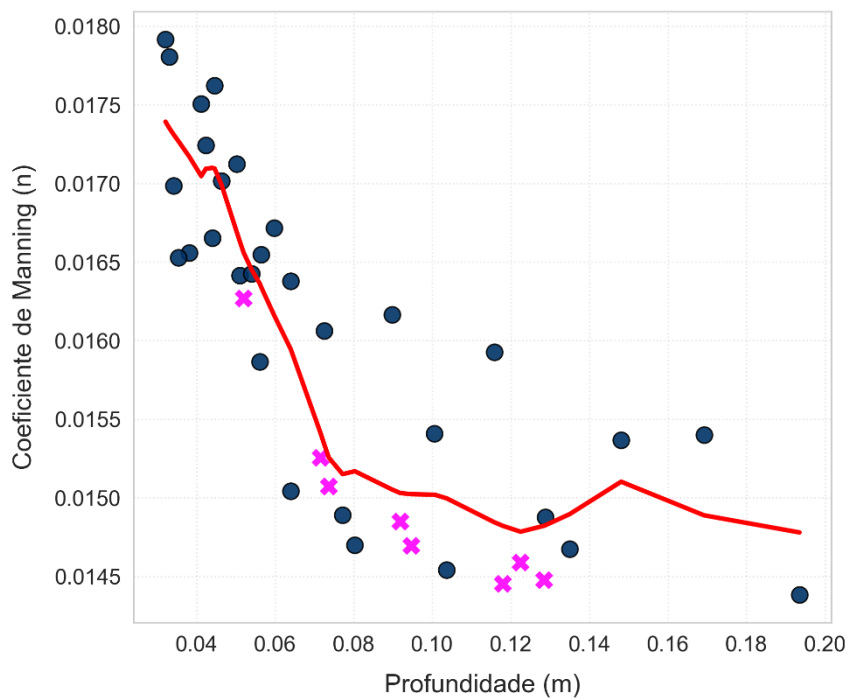
Fonte: Autora (2025).

Figura 7: Comportamento de n em função da profundidade para o canal A3T8.



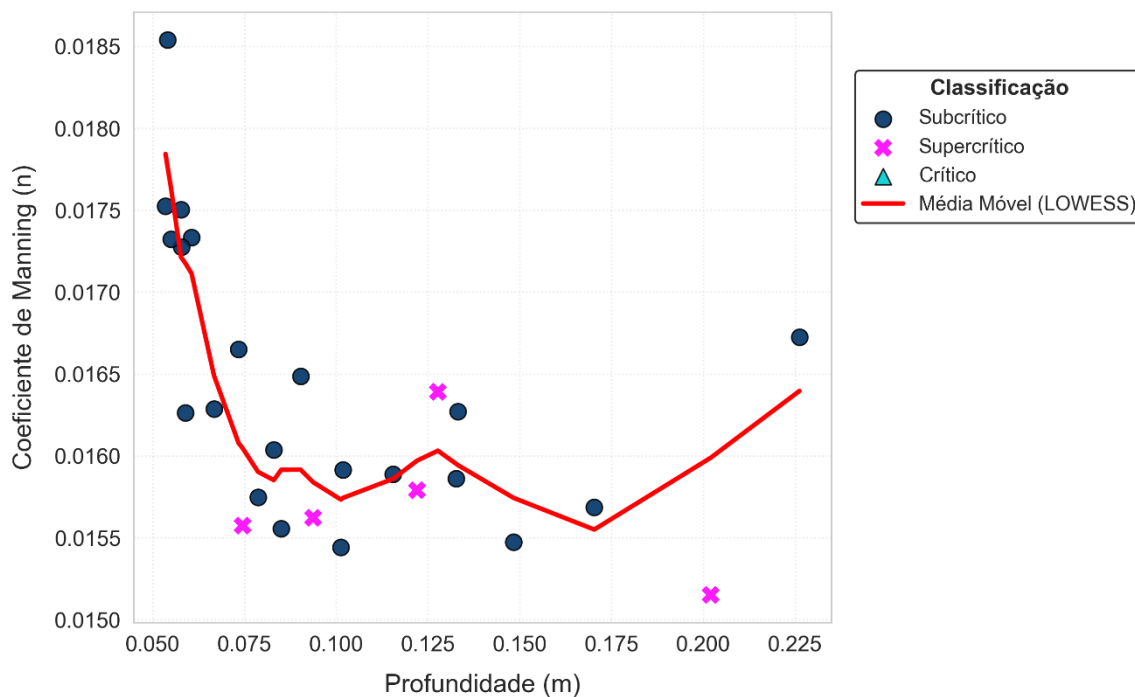
Fonte: Autora (2025).

Figura 8: Comportamento de n em função da profundidade para o canal A4T8.



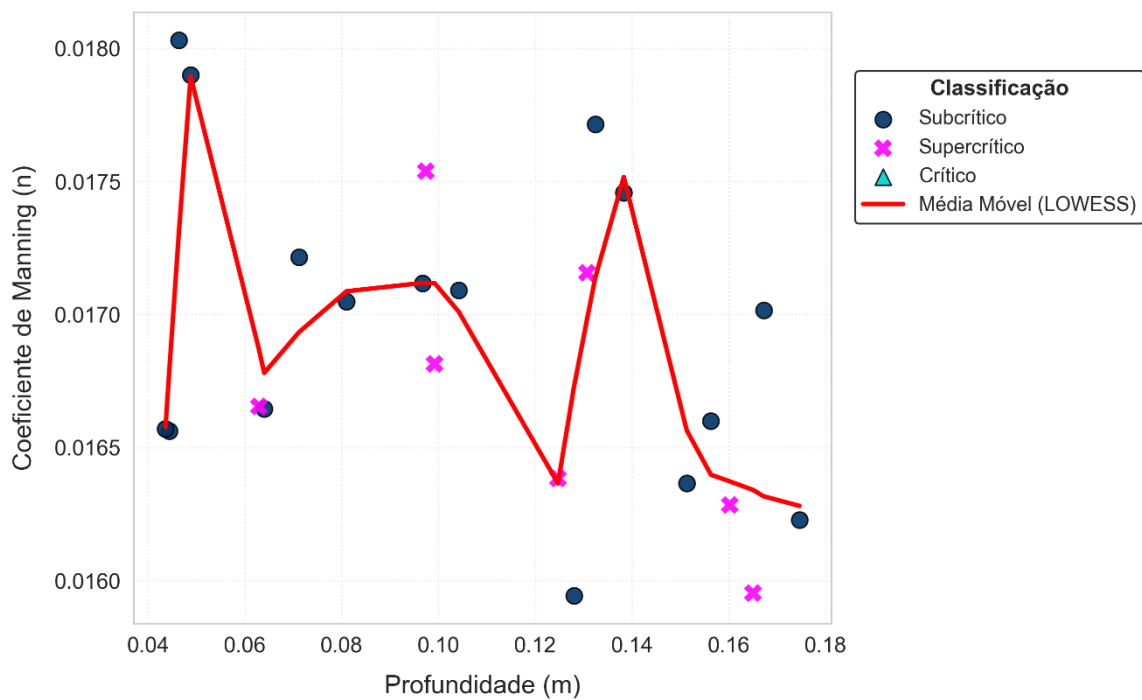
Fonte: Autora (2025).

Figura 9: Comportamento de n em função da profundidade para o canal A5T8.



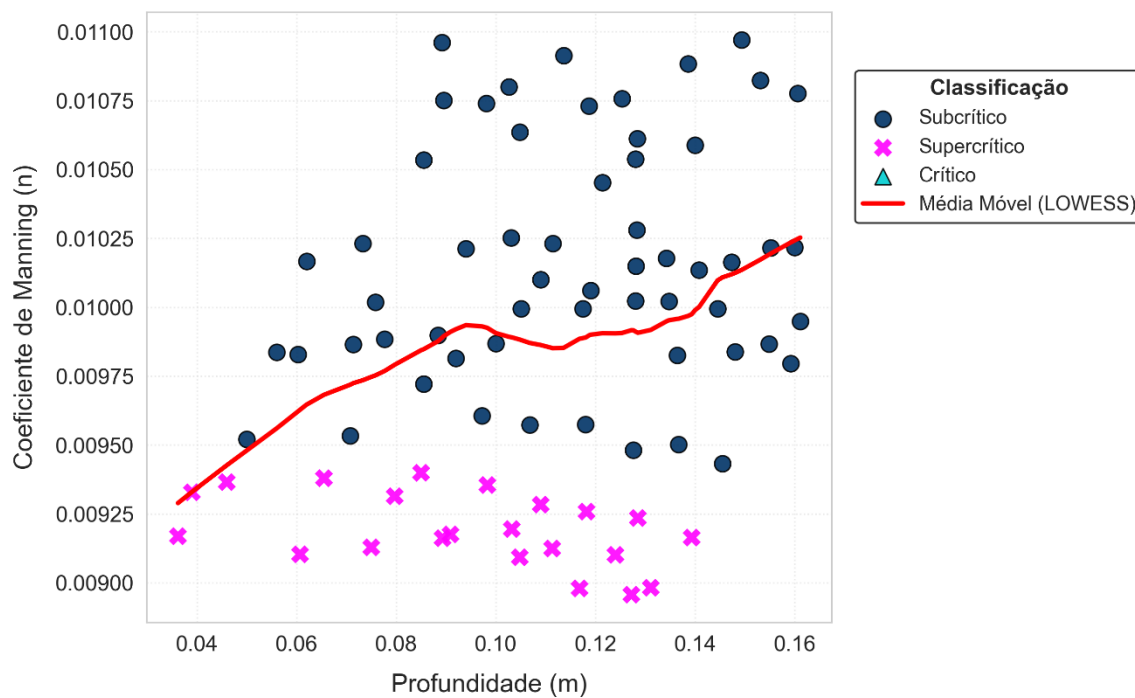
Fonte: Autora (2025).

Figura 10: Comportamento de n em função da profundidade para o canal A6T8.



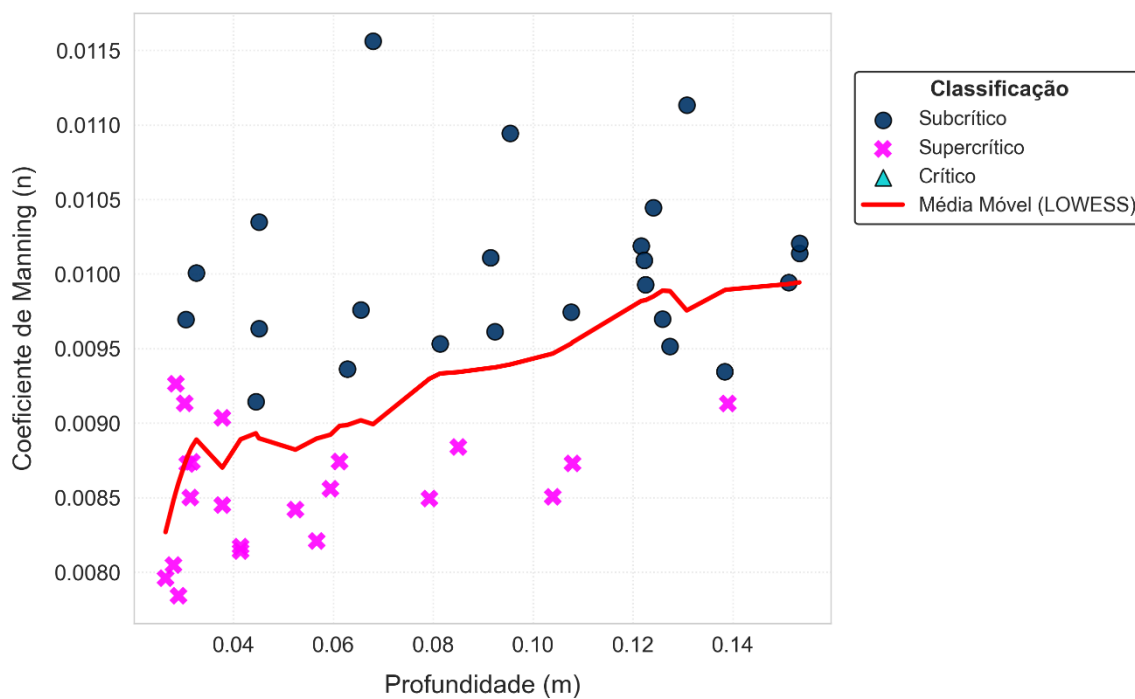
Fonte: Autora (2025).

Figura 11: Comportamento de n em função da profundidade para o canal AC9.



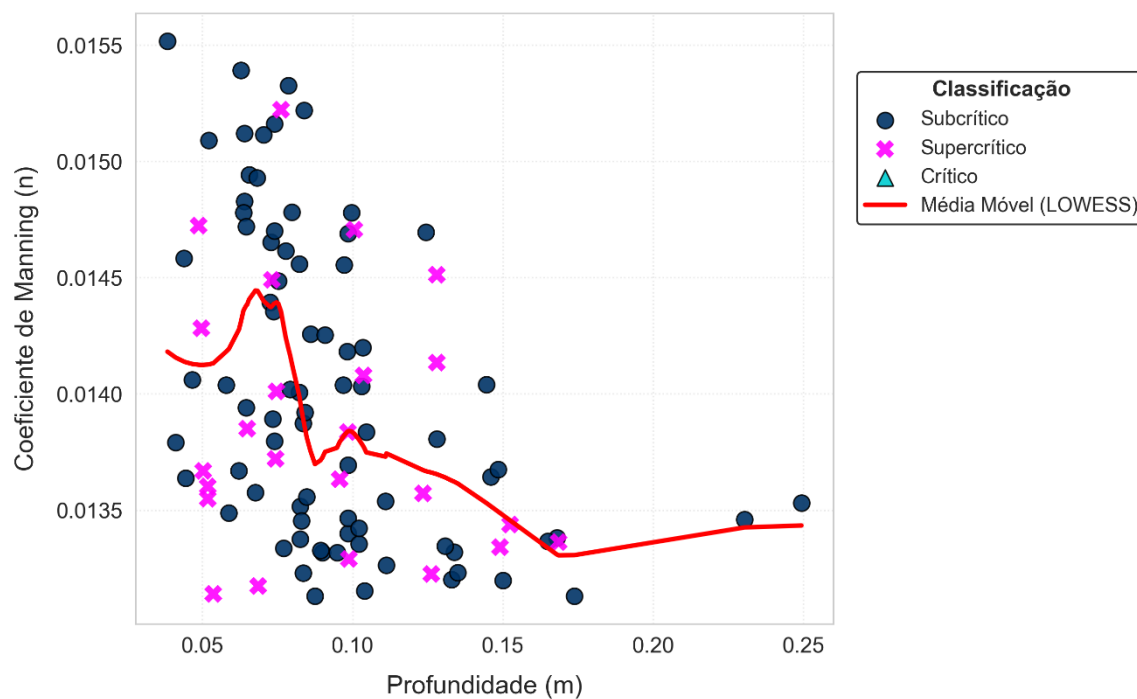
Fonte: Autora (2025).

Figura 12: Comportamento de n em função da profundidade para o canal AR6.



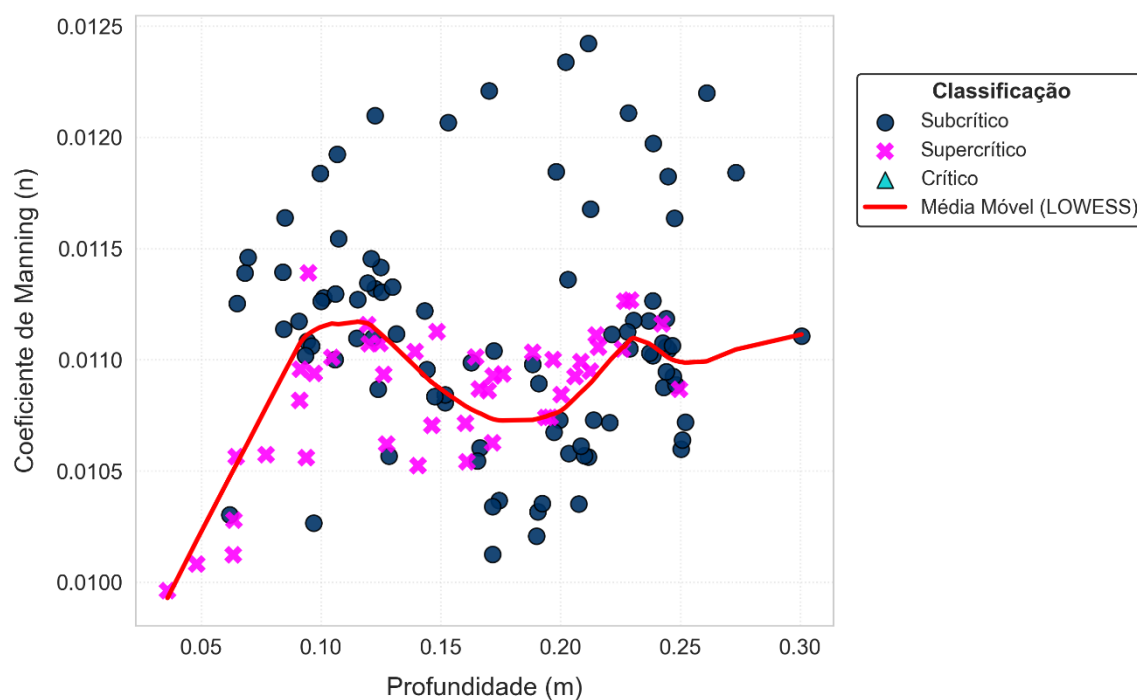
Fonte: Autora (2025).

Figura 13: Comportamento de n em função da profundidade para o canal CC135.



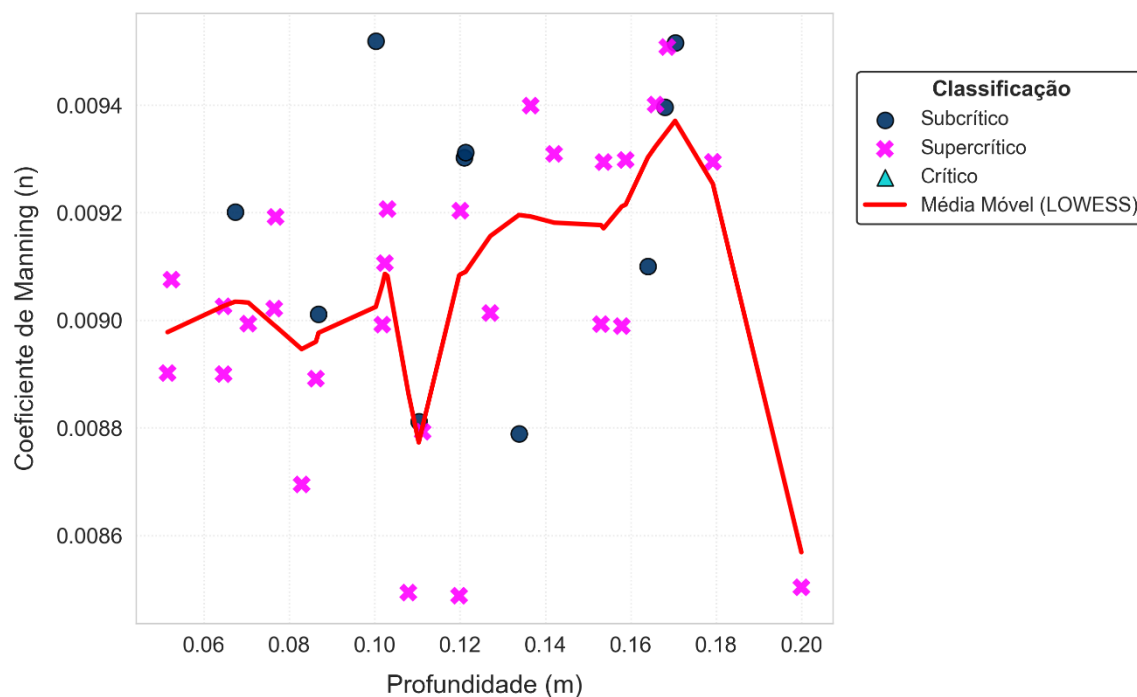
Fonte: Autora (2025).

Figura 14: Comportamento de n em função da profundidade para o canal CEC24.



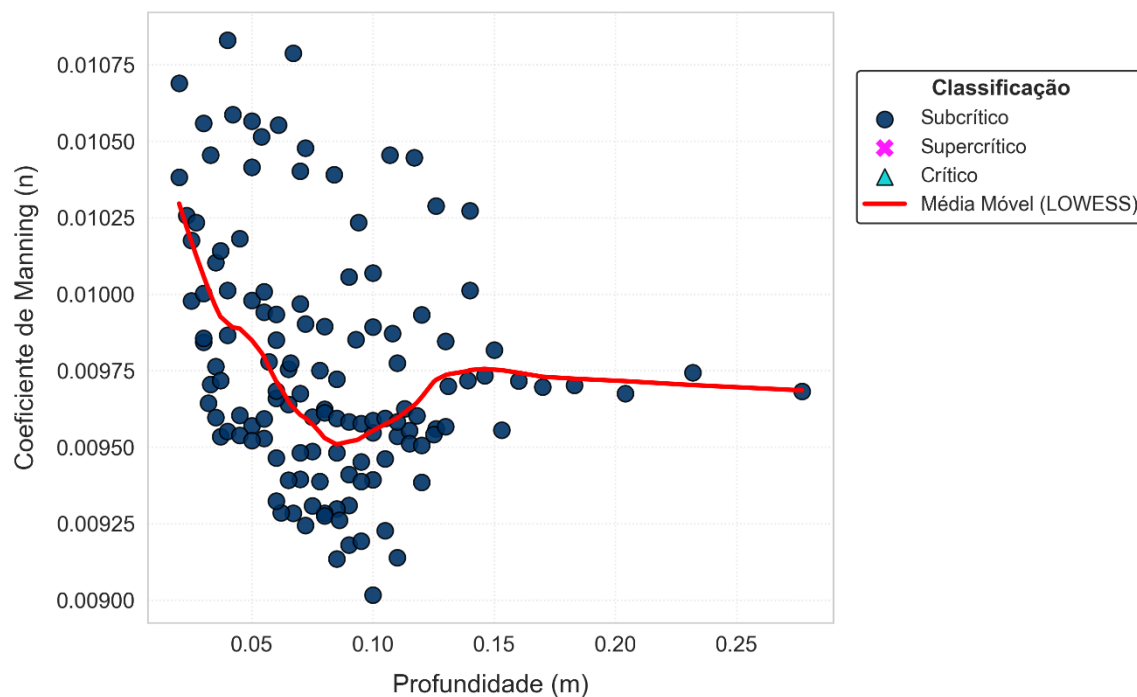
Fonte: Autora (2025).

Figura 15: Comportamento de n em função da profundidade para o canal PC7.



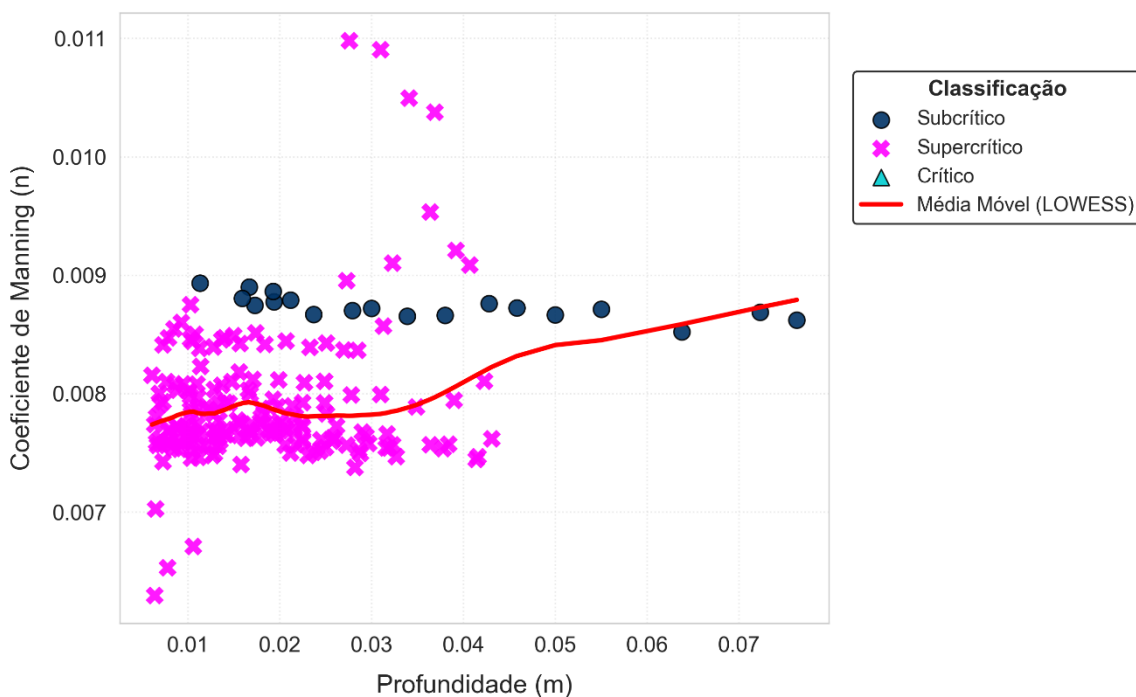
Fonte: Autora (2025).

Figura 16: Comportamento de n em função da profundidade para o canal VR10.



Fonte: Autora (2025).

Figura 17: Comportamento de n em função da profundidade para o canal VRE11.



Fonte: Autora (2025).

O Quadro 4 a seguir apresenta o intervalo de valores do coeficiente n para os materiais dos canais estudados.

Quadro 4: Intervalos do Coeficiente de Manning (n) por Material

<i>Material</i>	<i>Intervalo de n</i>
Areia	0,011 – 0,017
Aço	0,009 – 0,0108
Cerâmico	0.010 – 0.012
Cimento Amianto	0,008 – 0,011
Concreto	0.013 – 0.015
PVC	0,0085 – 0,0092
Vidro	0,0072 – 0,011

Fonte: Autora (2025).

Em canais com razão de aspecto inferior a 5, a dispersão do coeficiente chegou a 22% em comparação com canais largos. Esse comportamento está alinhado com

estudos anteriores que associam correntes secundárias a redistribuições não uniformes de tensões de cisalhamento. No entanto, diferentemente de pesquisas que relacionam a turbulência apenas ao número de Reynolds, este trabalho identificou que a variação do coeficiente também está correlacionada ao número de Froude, principalmente em regimes próximos ao crítico, onde a instabilidade do escoamento amplifica os efeitos das correntes transversais.

Em suma, ao comparar os resultados obtidos com valores teóricos da literatura, verificou-se que os coeficientes calculados para certas profundidades diferem de forma significativa dos valores tabelados. Isso reforça a necessidade de um modelo que considere a variação do coeficiente de Manning em função das características hidráulicas do escoamento, e não apenas um valor fixo baseado no tipo de material do canal.

5. CONCLUSÕES

Este estudo buscou comprovar que o coeficiente de Manning varia significativamente em função da profundidade do escoamento e da presença de correntes secundárias em canais abertos, contrariando a abordagem tradicional que o trata como constante. Os resultados experimentais, obtidos a partir de dados coletados em canais com diferentes geometrias e materiais, confirmaram essa hipótese. Em canais triangulares revestidos com areia, por exemplo, a variação do coeficiente atingiu 18% para profundidades entre 0,18 a 0,20 m, enquanto em canais circulares de concreto, a variação foi de 7% no mesmo intervalo. Esses valores demonstram que a rugosidade não é o único fator determinante, mas sim a interação entre geometria, profundidade e fenômenos hidrodinâmicos locais.

Uma contribuição prática deste estudo é a evidência de que a incorporação de parâmetros como a razão de aspecto e a intensidade das correntes secundárias pode melhorar a precisão do coeficiente de Manning. Nos canais retangulares analisados, por exemplo, a consideração desses fatores reduziu o erro médio de previsão de vazão em comparação com o modelo tradicional. Essa abordagem ajustada pode ser aplicada em projetos de drenagem urbana e canais de irrigação, onde variações locais de profundidade são frequentes.

Entre as limitações, destaca-se a ausência de ensaios em canais naturais com vegetação ou sedimentos em suspensão, fatores que podem alterar drasticamente a rugosidade efetiva. Além disso, os dados experimentais foram restritos a condições de laboratório. Para superar essas lacunas, sugere-se estudos em campo para validar o modelo proposto em condições reais, bem como análises de sensibilidade que considerem a interação entre o coeficiente de Manning, transporte de sedimentos e vegetação ciliar.

Por fim, este trabalho reforça que a hidráulica de canais abertos exige modelos mais dinâmicos, capazes de integrar variáveis hidrodinâmicas frequentemente negligenciadas. A substituição de valores fixos por funções dependentes das condições locais do escoamento não só aumenta a precisão de projetos hidráulicos, mas também reduz riscos de superdimensionamento ou falhas em estruturas críticas, como vertedouros e canais de controle de enchentes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BA, T; CHENG, N. S. Flow characteristics in rectangular channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 138, n. 4, p. 341-350, 2012.

CABRAL DA SILVA, T. Efeitos de Forma na Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais. 1992. 85f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

CHENG, N. S. et al. Aspect ratio effects in open channel flow. *Journal of Hydraulic Research*, v. 49, n. 2, p. 204-215, 2011.

CHOW, V. T. *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1959.

COSTA, R. H. R.; COSTA, M. H. R.; CASTRO, N. M. R. Variações do coeficiente de Manning em escoamentos não uniformes. *Revista de Engenharia Hidráulica*, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2024.

GOULART, J. N. V. *Análise Experimental de Escoamentos Cisalhantes em Canais Compostos Fechados*. Tese de Doutorado, PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MEYER, L.; REHME, K. Large-scale turbulence phenomena in compound rectangular channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 8, p. 286-304, 1994.

NEZU, I. *Compound Open-Channel Turbulence and its Role in River Environment*. Department of Civil and Global Environment Engineering, Kyoto University, Japa *n*, 1994.

NEZU, I.; NAKAGAWA, H. *Turbulence in Open-Channel Flows*. IAHR Monograph, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, 1993.

NOGUEIRA NETO, C. S. Avaliação de equações para cálculo do escoamento uniforme em canais lisos e rugosos. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

PIMENTA, C. F. *Contribuição para o Cálculo da Perda de Carga nos Canais em Regime Uniforme*. 1966. 147f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1966.

PORTO, R. M. Hidráulica básica. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

PROOIJER, B. C.; BATIJES, J.; UIJTTEWAAL, W. S. J. Momentum Exchange in straight uniform compound channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 131, p. 175-183, 2005.

PROOIJER, B. C.; UIJTTEWAAL, W. S. J. A linear approach for the evolution of coherent structures in shallow mixing layers. *Physics of Fluids*, v. 14, p. 4105-4114, 2002.

SHIONO, K.; KNIGHT, D. W. Turbulent Open-Channel Flows with Variable Depth across the Channel. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 222, p. 617-646, 1991.

STOESSER, T.; MCSHERRY, R.; FRAGA, B. Secondary currents in open channels: a review. *Water Resources Research*, v. 51, n. 5, p. 3581-3598, 2015.

WHITE, F. M. Fluid Mechanics. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

XAVIER, C. M. Análise experimental e numérica de escoamentos turbulentos em canais compostos empregando simulação de grandes escalas e método de elementos finitos. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013

YE, B. C. Open channel flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128, n. 1, p. 20-39, 2002.

ZHANG, Y. et al. Impact of secondary currents on sediment transport in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 147, n. 8, p. 1-12, 2021.