
ESTUDO DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE UM CANAL DE LABORATÓRIO UTILIZANDO PLACAS DE RUGOSIDADE

Gustavo Henrique Pereira Silva

Luiz Felipe Azevedo Merlo

Matheus Cristiano Cavalcanti

Pedro Bittar Kalil

Liliane Frosini Armelin

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Resumo

A engenharia hidráulica busca ao longo de anos o entendimento de fatores que influenciem o escoamento, e um dos mais desafiadores, sem dúvida, é o coeficiente de rugosidade. Este trabalho visa estudar os efeitos da rugosidade de um canal didático equipado com placas de rugosidade em seu leito por meio de ensaios de escoamentos, alterando a vazão e a declividade de fundo. A partir dessas investigações, em conjunto com a elaboração de gráficos, foi possível levantar equações que relacionam o coeficiente de rugosidade com a vazão e a altura da linha d'água para cada declividade de fundo simulada que, na maioria dos casos, apresentou correlação aceitável. Comparou-se ainda a curva-chave resultante para a declividade de 1% com a curva-chave resultante de estudo analítico realizado para o mesmo canal, em que se utilizou a mesma placa de rugosidade, e isso demonstrou que o estudo empírico é distinto do estudo analítico.

Palavras-chave: Coeficiente de Manning. Canal didático. Placa de rugosidade.

1 INTRODUÇÃO

Entre as variáveis que compõem um canal hidráulico, a rugosidade pode ser definida como o fator responsável pelo atrito, tendo a capacidade de alterar a estrutura do escoamento e criar obstáculos, seja alterando a vazão ou causando variações na linha d'água. A sua obtenção em uma situação específica pode facilitar a compreensão dos fenômenos ocorrentes no canal e caracterizá-los de acordo com suas manifestações.

Ao longo dos anos de estudo da engenharia hidráulica, muitos buscaram maneiras de entender o comportamento dos canais hidráulicos, seja de modo teórico ou por aplicações práticas em laboratórios e cursos d'água. Antoine de Chézy (1718-1798) foi pioneiro nos estudos dos canais hidráulicos, nos quais identificou que a velocidade do curso d'água poderia ser encontrada em função de parâmetros como a área do canal, a declividade e, principalmente, a rugosidade, variável do coeficiente de Chézy. A resistência à passagem da água no canal poderia ser definida de acordo com o material do qual era composto, além de fatores como o acabamento e o tempo de uso. Posteriormente, o engenheiro Robert Manning (1816-1897) complementou seu estudo ressaltando a importância da rugosidade e como esta teria uma grande influência para um bom comportamento de um fluxo d'água. Silva, Rodrigues e Tavares (2013) apontam que uma força de resistência que se opõe ao movimento é a principal responsável pela perda de carga, sendo essa força função da viscosidade do fluido e da rugosidade do canal.

Este estudo teve como objetivos determinar e estudar a influência do coeficiente de rugosidade de uma placa de grande rugosidade adquirida de determinado fabricante que, uma vez instalada em um canal hidráulico, causa resistência ao escoamento. Especificamente, para atingir esses objetivos, realizaram-se inúmeras simulações variando a vazão e a declividade de fundo.

2 ESTUDOS EXISTENTES

As características dos canais hidráulicos vêm sendo estudadas há séculos, tendo seu marco no final do século XIX, pelo engenheiro Robert Manning. Durante o processo histórico de desenvolvimento de pesquisas, alguns estudos focavam os escoamentos

livres e as grandezas, como a vazão, a velocidade de escoamento e a altura da linha d'água, que variam em função da declividade do canal. Outro elemento importante dentro dessa equação é a rugosidade, sendo o mais difícil de determinar na vida prática, uma vez que esse parâmetro varia ao longo do tempo, dependendo das condições de manutenção do canal.

Baptista e Lara (2010) abordaram essa dificuldade apontando a necessidade de analisar a influência do atrito no escoamento por meio do coeficiente de rugosidade de Manning η . A maior dificuldade no cálculo do escoamento, segundo Baptista e Lara (2010), encontra-se nas análises do atrito, e, desse modo, para a fórmula de Manning, essa dificuldade pode ser traduzida pela rugosidade η .

A determinação direta desse coeficiente vem de um trabalho empírico que adotou a equação de Bernoulli (Equação 1) para a determinação da linha de energia:

$$J = \frac{\left(z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g}\right) - \left(z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g}\right)}{\Delta x} \quad (1)$$

onde:

J = declividade da linha de energia (m/m);

z_1 e z_2 = cargas de posição (m);

y_1 e y_2 = alturas das linhas da água (m);

V_1 e V_2 = velocidades médias de escoamento (m/s);

Δx = perda de carga (m).

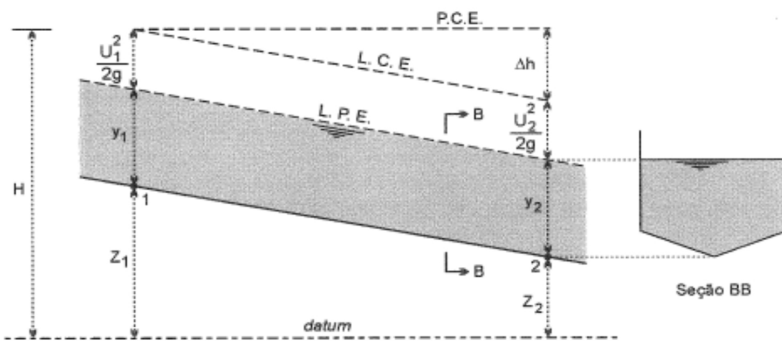


Figura 1 Representação gráfica da equação de Bernoulli

Fonte: Baptista e Lara (2010).

$$\eta = \frac{Rh^{2/3} \cdot J^{1/2}}{V} \quad (2)$$

onde:

η = coeficiente de Manning;

Rh = raio hidráulico (m);

J = declividade da linha de energia (m/m);

V = velocidade média de escoamento (m/s).

Como nem sempre é possível determinar η por meio de processos diretos, existem métodos específicos para que esse valor seja estimado. Ademais, existem tabelas que fornecem valores em η em função das características da superfície de contato, que podem ser encontradas em diversas literaturas, cujos dados foram obtidos por meio de experimentos. Extraíram-se as tabelas 2 e 3 do livro *Fundamentos de engenharia hidráulica*, de Márcio Baptista e Márcia Lara (2010), as quais exemplificam o que foi mencionado anteriormente.

TABELA 1

Coeficiente de rugosidade de Manning para canais artificiais

Revestimento	Rugosidade		
	Mínima	Usual	Máxima
Concreto pré-moldado	0,011	0,013	0,015
Concreto com acabamento	0,013	0,015	0,018
Concreto sem acabamento	0,014	0,017	0,020
Concreto projetado	0,018	0,020	0,022
Gabiões	0,022	0,030	0,035
Espécies vegetais	0,025	0,035	0,070
Aço	0,010	0,012	0,014
Ferro fundido	0,011	0,014	0,016
Aço corrugado	0,019	0,022	0,028
Solo sem revestimento	0,016	0,023	0,028
Rocha sem revestimento	0,025	0,035	0,040

Fonte: Baptista e Lara (2010).

TABELA 2

Coefficiente de rugosidade para canais naturais

Tipo	Características	Rugosidade		
		Mínima	Normal	Máxima
Canais de pequeno porte em planícies (B < 30 m)	Limpos	0,025	0,033	0,045
	Trechos lentos	0,050	0,070	0,080
Canais de pequeno porte em montanhas (B < 30 m)	Leito desobstruído	0,030	0,040	0,050
	Leito com matacões	0,040	0,050	0,070
Canais de grande porte (B > 30 m)	Seções regulares	0,025	-	0,060
	Seções irregulares	0,035	-	0,100
Planícies de inundação	Pastagens	0,025	0,030	0,035
	Culturas	0,020	0,040	0,050
	Vegetação densa	0,045	0,070	0,160

Fonte: Baptista e Lara (2010).

Segundo Porto (2006), a fórmula de Manning, apresentada em 1889 por Manning e outros estudiosos, foi desenvolvida de maneira empírica para o cálculo do coeficiente C de Chézy. Tal equação relaciona o raio hidráulico da seção a um parâmetro η que depende da rugosidade da parede do canal, sendo representado pela equação de Manning:

$$C = \frac{1}{\eta} * Rh^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

onde:

C = coeficiente de Chézy;

η = coeficiente de rugosidade de Manning;

Rh = raio hidráulico (m).

Entretanto, quando se associa essa equação com a fórmula de Chézy, consegue-se estipular as formas-base de cálculo para escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugosos, com grande número de Reynolds, além da equação-base para cálculo de problemas com escoamento livre.

$$V = C\sqrt{Rh * J} \quad (4)$$

onde:

V = velocidade média da água (m/s);

Rh = raio hidráulico em (m);

J = a pente da linha d'água (m/m);

C = coeficiente de Chézy.

As tabelas 3 e 4 apresentam os valores do coeficiente de rugosidade de Manning segundo a natureza das paredes, as condições de manutenção, a existência de meandros, a qualidade do fluido que está escoando, as condições das margens e a possibilidade de vegetação na calha: fundo ou margens. Há de se considerar também que Manning tentou caracterizar o máximo possível a condição do conduto para estabelecer o coeficiente de rugosidade correspondente, o que foi de grande auxílio para a elaboração de projetos de engenharia de canalização e retificação.

TABELA 3

Determinação do parâmetro η por meio da natureza das paredes do canal e de suas condições

Natureza das paredes	Condições			
	Muito boas	Boas	Regulares	Más
Tubos de ferro fundido sem revestimento	0,012	0,013	0,014	0,015
Idem, com revestimentos de alcatrão	0,011	0,012	0,013	...
Tubos de ferro galvanizado	0,013	0,014	0,015	0,017
Tubos de bronze ou de vidro	0,009	0,010	0,011	0,013
Condutos de barro vitrificado, de esgotos	0,011	0,013	0,015	0,017
Condutos de barro, de drenagem	0,011	0,012	0,014	0,017
Alvenaria de tijolos com argamassa de cimento: condutos de esgoto, de tijolos	0,012	0,013	0,015	0,017
Superfícies de cimento alisado	0,010	0,011	0,012	0,013
Superfícies de argamassa de cimento	0,011	0,012	0,013	0,015
Tubos de concreto	0,012	0,013	0,015	0,016
Condutos e aduelas de madeira	0,010	0,010	0,012	0,013
Calhas de prancha de madeira aplainada	0,010	0,012	0,013	0,014
Idem, não aplainada	0,011	0,013	0,014	0,015
Idem, com pranchões	0,012	0,015	0,016	...
Canais com revestimento de concreto	0,012	0,014	0,016	0,018
Alvenaria de pedra argamassa	0,017	0,020	0,025	0,030
Alvenaria de pedra seca	0,025	0,033	0,033	0,035
Alvenaria de pera aparelhada	0,013	0,014	0,015	0,017
Calhas metálicas lisas (semicirculares)	0,011	0,012	0,013	0,015
Idem, corrugadas	0,023	0,025	0,028	0,030
Canais de terra, retilíneos e uniformes	0,017	0,020	0,023	0,025
Canais abertos em rocha, lisos e uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canais abertos em rocha, irregulares, ou de paredes de pedra irregulares e mal-arrumadas	0,035	0,040	0,045	...
Canais dragados	0,025	0,028	0,030	0,033
Canais curvilíneos e lamosos	0,023	0,025	0,028	0,030
Canais com leito pedregoso e vegetação nos taludes	0,025	0,030	0,035	0,040
Canais com fundo e terra e taludes empedrados	0,028	0,030	0,033	0,035
ARROIOS E RIOS				
1. Limpos, retilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
2. Como em 1, porém com vegetação e pedras	0,030	0,033	0,035	0,040
3. Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos	0,035	0,040	0,045	0,055
4. Como em 3, águas baixas, declividade fraca	0,040	0,045	0,050	0,045
5. Como em 3, com vegetação e pedras	0,033	0,035	0,040	0,060
6. Como em 4, com pedras	0,045	0,050	0,055	0,080
7. Com margens espaiadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
8. Com margens espaiadas, muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

Fonte: Porto (2006).

TABELA 4

Determinação do parâmetro η por meio da natureza das paredes do canal

Nº	Natureza das paredes	η
1	Canais de chapas com rebites embutidos, juntas perfeitas e águas limpas. Tubos de cimento e de fundição em perfeitas condições.	0,011
2	Canais de cimento muito liso, de dimensões limitadas, de madeira aplainada e lixada, em ambos os casos; trechos retilíneos compridos, curvas de grande raio e água limpa. Tubos de fundição usados.	0,012
3	Canais de reboco de cimento liso, porém com curvas de raio limitado e águas não completamente limpas; construídos com madeira lisa, mas com curvas de raio moderado.	0,013
4	Canais com reboco de cimento não completamente liso; de madeira como no nº 2, porém com traçado tortuoso e curvas de pequeno raio e juntas imperfeitas.	0,014
5	Canais com paredes de cimento não completamente lisas, com curvas estreitas e águas com detritos; construídos de madeira não aplainada de chapas rebitadas.	0,015
6	Canais com reboco de cimento não muito alisado e pequenos depósitos no fundo; revestidos por madeira não aplainada; de alvenaria construída com esmero; de terra, sem vegetação.	0,016
7	Canais com reboco de cimento incompleto, juntas irregulares, andamento tortuoso e depósitos no fundo de alvenaria revestindo taludes não bem perfilados.	0,017
8	Canais com reboco de cimento rugoso, depósitos no fundo, musgo nas paredes e traçado tortuoso.	0,018
9	Canais de alvenaria em más condições de manutenção e fundo com barro, ou de alvenaria de pedregulhos; de terra, bem construídos, sem vegetação e com curvas de grande raio.	0,02
10	Canais de chapas rebitadas e juntas irregulares; de terra, bem construídos, com pequenos depósitos no fundo e vegetação rasteira nos taludes.	0,022
11	Canais de terra, com vegetação rasteira no fundo e nos taludes.	0,025
12	Canais de terra, com vegetação normal, fundo com cascalhos ou irregular por causa de erosões; revestidos com pedregulhos e vegetação.	0,030
13	Álveos naturais, cobertos de cascalhos e vegetação.	0,035
14	Álveos naturais, andamento tortuoso.	0,040

Fonte: Porto (2006).

De acordo com Manning e as fórmulas explícitas por ele, fica evidente que o coeficiente C da fórmula de Chézy depende do fator de atrito f , que é função do número de Reynolds e da rugosidade da parede, apesar de o fator de atrito em tubos circulares ser de mais fácil definição. Em razão da menor variedade de materiais utilizados para tal, o caso é tratado de maneira diferente em canais, por conta de uma ampla diversidade dos tipos de revestimentos das paredes e de suas geometrias.

Segundo Porto (2006), como a formulação de Manning é mais popular para projetos de canais, a parte da escolha do valor η é de extrema importância e exige critério

e bom senso do projetista responsável, pois, mesmo em canais regulares, outros fatores podem vir a alterar a rugosidade, como crescimento de vegetação, processos de erosão ou sedimentação e até mesmo a presença de curvas no percurso por conta das alterações do perfil de velocidade do canal.

Por sua vez, Pimenta (1981) comenta que o regime uniforme possui fórmulas fundamentais que relacionam a velocidade média V , o raio hidráulico e o coeficiente de Chézy, além da área molhada e a declividade do fundo do conduto. O coeficiente pode ser encontrado por meio da fórmula de Bazin, que o estabelece em função do raio hidráulico e de um coeficiente γ de rugosidade, aplicado para diversos tipos de paredes:

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R_H}}} \quad (5)$$

onde:

γ = coeficiente de rugosidade, que pode variar de acordo com as informações contidas na Tabela 5.

TABELA 5

Valores de γ para cada tipo de parede

Categoria	γ	Natureza das paredes
1	0,06	Paredes muito lisas – cimento liso, madeira aparelhada etc.
2	0,16	Paredes lisas – tábuas – alvenaria de tijolos bem rejuntados.
3	0,46	Paredes de alvenaria de pedra bruta.
4	0,85	Paredes mistas, parte revestida, parte em terra.
5	1,30	Paredes de terra nas condições ordinárias.
6	1,75	Paredes apresentando rugosidades excepcionalmente grandes.

Fonte: Pimenta (1981).

Ganguillet e Kutter (1870 *apud* Pimenta, 1981) introduziram a declividade i para o cálculo de C , como demonstrado a seguir:

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{i} + \frac{1}{\eta}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{i}\right) \frac{\eta}{\sqrt{R_H}}} \quad (6)$$

onde:

C = coeficiente de Chézy;

η = coeficiente de rugosidade;

Rh = raio hidráulico (m);

i = declividade média do canal (m/m).

Sendo η o coeficiente de rugosidade de Manning responsável pela caracterização da natureza em cada parede, o autor apresenta alguns valores na Tabela 6.

TABELA 6

Classificação do coeficiente de Manning η

η	Natureza das paredes
0,009	Madeira aparelhada
0,010	Cimento liso
0,011	Argamassa de cimento com 1/3 de areia
0,012	Madeira serrada
0,013	Pedras e tijolos bem rejuntados
0,015	Tijolos rugosos
0,017	Alvenaria ordinária
0,020	Canais com pedregulho fino
0,025	Canais e rios em bom estado
0,030	Canais e rios com pedras e vegetações
0,035	Canais e rios em mau estado

Fonte: Pimenta (1981).

Pimenta (1981) aponta que a precisão esperada é menor do que a obtida no cálculo de condutos forçados. São razões para isso:

- Problemas variados para cada canal e o fato de as fórmulas serem generalizadas.
- A rugosidade nos canais é mais difícil de ser avaliada, pois têm maior variação.
- Algumas das fórmulas são obtidas através de canais de pequenas dimensões, sendo o aumento da turbulência um fator preocupante para a sua extensão.

Em termos gerais, as fórmulas apontadas conduzem a resultados satisfatórios. Apesar disso, é necessária a rigorosa observação quanto à rugosidade utilizada e ao seu correto significado.

Cordeiro *et al.* (2020), ao estudarem o mesmo canal com a base teórica vista nos tópicos anteriores, tiveram como objetivo determinar o coeficiente de rugosidade da mesma placa de fundo utilizada no presente estudo denominada “banco de cascalho”, porém não o fizeram de forma empírica, e sim de forma analítica.

Como optaram por trabalhar com a rugosidade de Manning, estimaram a rugosidade absoluta média equivalente por meio de duas metodologias: escolheram o valor mais representativo e o relacionaram com o coeficiente de Manning a partir da Equação 7.

$$\eta = 0,039.\varepsilon^{1/6} \quad (7)$$

onde:

η = coeficiente de Manning;

ε = rugosidade média (m).

O coeficiente de Manning da placa resultante foi $\eta = 0,0633$. Para as paredes do canal, compostas de vidro, adotaram-se um coeficiente de Manning de 0,010 e uma variação da linha d'água de 0,02 m, partindo de uma altura de 0,04 m. Assim, tendo os valores de declividade do canal, no caso 1%, variação da linha d'água e, consequentemente, do coeficiente de Manning, foi possível obter a vazão por meio da equação de Manning.

Quando se encontraram os valores de vazão de acordo com a variação da linha d'água, foi possível montar o Gráfico 1, que apresenta a variação da vazão em função da linha d'água.

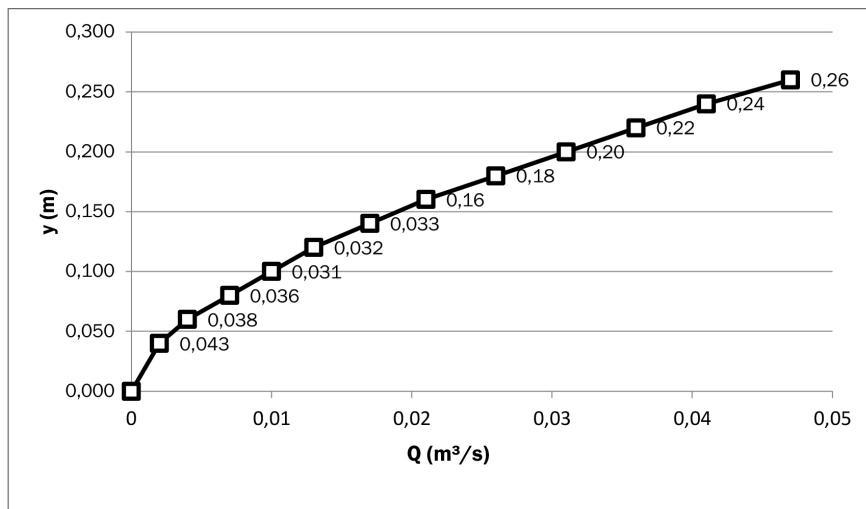


Gráfico 1 Variação da linha d'água em função da vazão no canal

Fonte: Cordeiro et al. (2020).

Tomando como premissa o fato de que o canal a ser estudado apresentava uma velocidade de escoamento muito alta e linha d'água irregular, a placa para controle de rugosidade tornaria o escoamento uniforme, reduzindo assim a velocidade do canal. O trabalho realizado demonstra a alteração do coeficiente rugoso de acordo com a elevação da linha d'água.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a elaboração das curvas-chave foi a de ensaios em laboratório utilizando o canal didático (Figura 2), objeto deste estudo. Instalaram-se as placas de rugosidade (Figura 3) no fundo, e duas pontas limnimétricas foram posicionadas em pontos estratégicos. As pontas têm a finalidade de medir a altura da linha d'água a ser denominada variável y , e as duas medições constataram a ocorrência do escoamento uniforme. A medição de vazão foi realizada através do medidor do canal do tipo eletromagnético, e a declividade pôde ser alterada pelo dispositivo no próprio canal.



Figura 2 Canal hidráulico do laboratório

Fonte: Elaborada pelos autores.



Figura 3 Placa de rugosidade

Fonte: Elaborada pelos autores.

A fim de buscar um escoamento uniforme no canal, independentemente da vazão experimental, foi necessário posicionar as placas ao longo numa determinada disposição singular (Figura 4), e essa necessidade ocorreu porque as placas contendo

a rugosidade a ser estudada não eram suficientes para cobrir os 10 metros do canal. Foram necessárias, além disso, placas com superfície ondulada (Figura 5) para que a transição entre a placa com pedras e o fundo liso do canal não ocorresse de forma abrupta, resultando em grande variação da linha d'água com propagação para montante e modificando o escoamento de uniforme para variado. Como esperado, ocorreu um remanso no trecho final do canal, uma vez que este termina em queda brusca. A alternativa foi fazer as medições fora da área de influência do remanso.

Diante de todas essas influências desfavoráveis à busca do escoamento uniforme, com muita dificuldade, chegou-se ao arranjo descrito que garantiu em um trecho do canal a uniformidade da linha d'água. Ainda assim, trabalhou-se com a média das duas medições realizadas de altura da linha d'água.

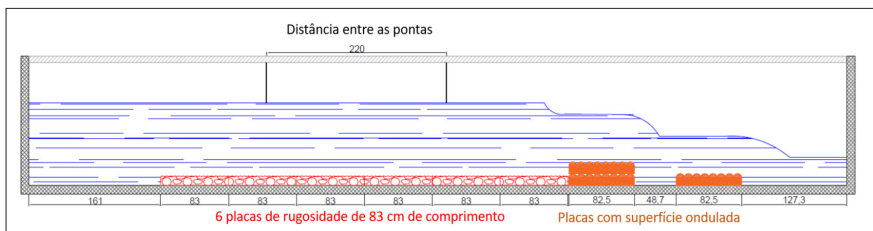


Figura 4 Corte longitudinal com o posicionamento das placas no canal

Fonte: Elaborada pelos autores.

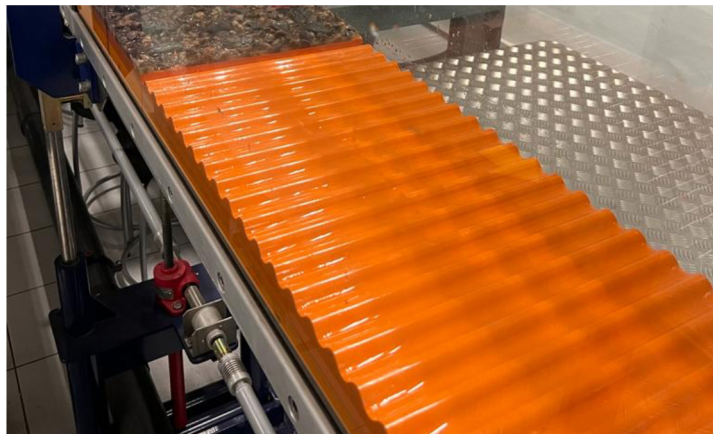


Figura 5 Placa com superfície ondulada

Fonte: Elaborada pelos autores.

Posicionaram-se seis placas de rugosidade em sequência, a 161 cm do início do canal, com duas placas com superfície “em onda” sobrepostas, e com uma última placa distanciada a 82,5 cm das demais.

Desse modo, por causa da uniformidade do escoamento, era o momento de iniciar os ensaios, divididos em quatro etapas, nas quais havia uma variação da declividade do canal (0,002 m/m, 0,003 m/m, 0,005 m/m e 0,010 m/m). Em cada uma das etapas, as medidas foram realizadas de acordo com a vazão do canal, inicialmente em 5 l/s, variando de 5 l/s até 30 l/s, vazão-limite suportada pelo equipamento. Realizaram-se duas medidas nas pontas limnimétricas distanciadas 220 cm uma da outra, e, para efeito de cálculo, foi utilizada a média aritmética dos valores obtidos. Portanto, em cada uma das quatro etapas dos ensaios, obtiveram-se cinco valores de altura da linha d'água, variando de acordo com a vazão.

Com os valores obtidos no experimento, foi possível relacionar a altura da linha d'água do escoamento uniforme y com a vazão Q , relação esta denominada “curva-chave”, correspondente a cada uma das declividades.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A etapa de ensaios no canal resultou na construção das tabelas 7, 8, 9 e 10, que mostram os dados coletados de altura da linha d'água para cada declividade de fundo e vazão.

TABELA 7

Dados coletados para $i = 1/200$ m/m

Q (l/s)	Ponta 1	Ponta 2	y médio (m)
0	0,0	0,0	0,0
5	61,4	65,2	0,063
10	89,1	89,9	0,090
15	108,8	110,8	0,110
20	122,9	125,4	0,124
25	145,2	145,4	0,145
30	156,6	160,1	0,158

Fonte: Elaborada pelos autores.

TABELA 8

Dados coletados para $i = 1/350$ m/m

Q (l/s)	Ponta 1	Ponta 2	y médio (m)
0	0	0	0,000
5	70,2	71,5	0,071
10	91,2	95,5	0,093
15	111,8	116,5	0,114
20	130,0	132,3	0,131
25	151,5	148,8	0,150
30	169,3	164,5	0,167

Fonte: Elaborada pelos autores.

TABELA 9

Dados coletados para $i = 1/500$ m/m

Q (l/s)	Ponta 1	Ponta 2	y médio (m)
0	0,0	0,0	0,0
5	69,3	68,7	0,069
10	99,5	98,1	0,099
15	120,9	118,6	0,120
20	139,6	134,7	0,137
25	155,6	150,2	0,153
30	173,8	165,0	0,169

Fonte: Elaborada pelos autores.

TABELA 10

Dados coletados para $i = 1/100$ m/m

Q (l/s)	Ponta 1	Ponta 2	y médio (m)
0	0,0	0,0	0,0
5	50,0	53,0	0,052
10	70,8	72,3	0,072
15	92,3	96,5	0,094
20	99,2	109,6	0,104
25	113,2	122,8	0,118
30	132,8	137,1	0,135

Fonte: Elaborada pelos autores.

Uma vez realizados os ensaios, foram construídas as curvas-chave as quais estão mostradas nos gráficos 2, 3, 4 e 5. Como este estudo se concentra na análise do coeficiente de rugosidade equivalente de Manning do canal, este foi inserido também, sendo um valor para cada ensaio realizado.

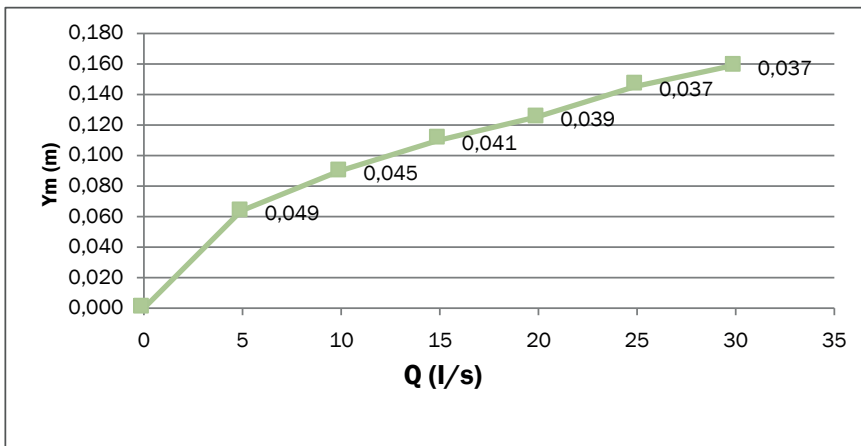


Gráfico 2 Curva-chave para $i = 0,002$ m/m

Fonte: Elaborado pelos autores.

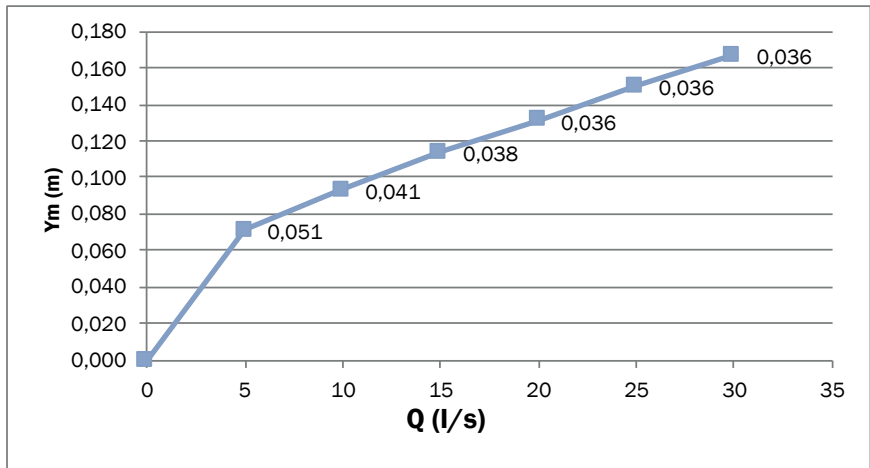


Gráfico 3 Curva-chave para $i = 0,003$ m/m

Fonte: Elaborado pelos autores.

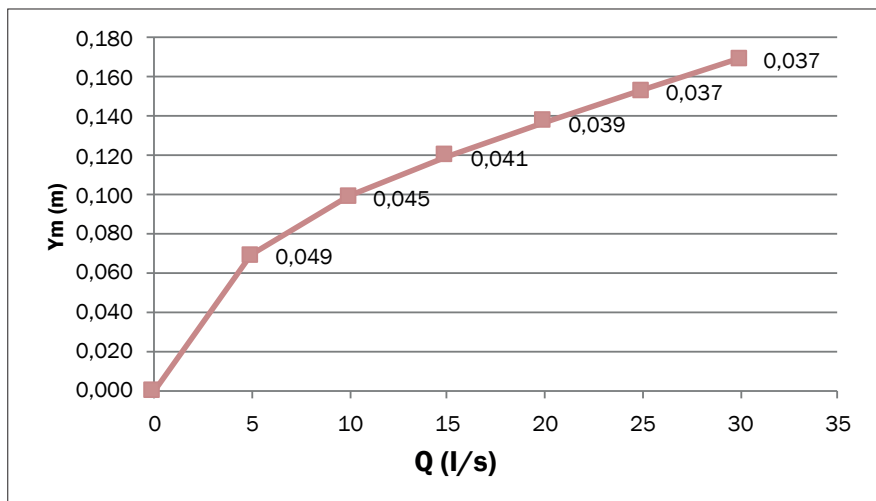


Gráfico 4 Curva-chave para $i = 0,005$ m/m

Fonte: Elaborado pelos autores.

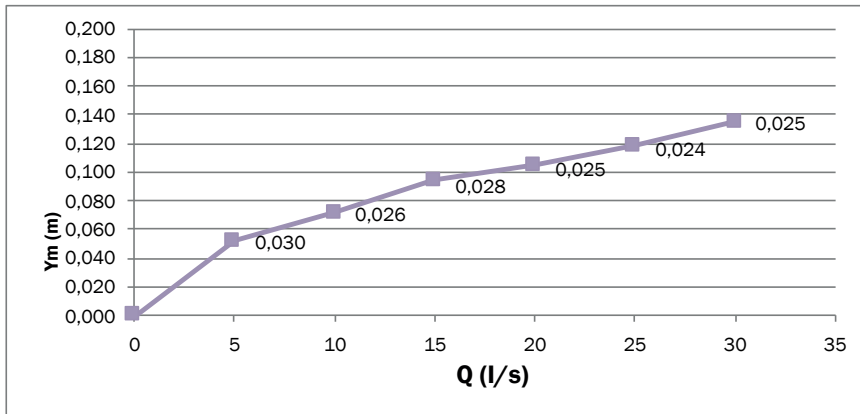


Gráfico 5 Curva-chave para $i = 0,010$ m/m

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quando se analisam as curvas-chave desenvolvidas (Gráfico 6), observa-se claramente que, para as vazões mais baixas e, portanto, para as alturas de linha d'água menores, os coeficientes de rugosidade são mais elevados, indicando que o material do fundo, o aço, é mais rugoso que o material das paredes, o vidro.

Observa-se também que, após uma determinada vazão, por volta de 20 l/s, o coeficiente de rugosidade passa a ser constante para cada declividade ensaiada. Isso significa que a influência do material do fundo deixa de ser importante para o escoamento.

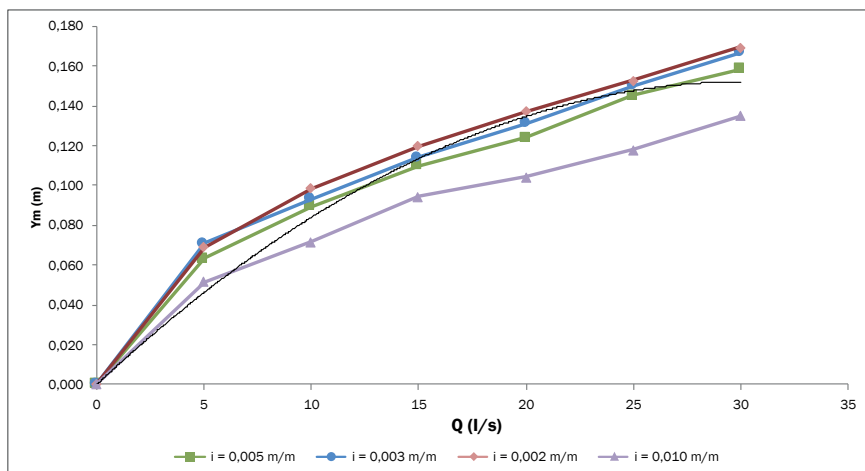


Gráfico 6 Comparação entre as curvas-chave

Fonte: Elaborado pelos autores.

O Gráfico 7 mostra as relações entre os coeficientes de rugosidade equivalentes de Manning, η , com a altura da linha d'água, em que foi ajustada uma curva para cada declividade de fundo por meio de regressão exponencial, permitindo a adoção de coeficientes equivalentes mais aproximados de forma rápida.

Observa-se que quanto menor a declividade do canal, maior a correlação das variáveis que interferem no escoamento. Isso pode indicar que a velocidade excessiva e a linha d'água agitada interferem nas medições das profundidades, pois a velocidade do escoamento interfere na uniformidade que se esperava ao longo da linha d'água. Os ensaios realizados para a declividade 1%, situação em que ocorrem as maiores velocidades, comprova esta hipótese, apresentando correlação muito baixa, em torno de 0,41.

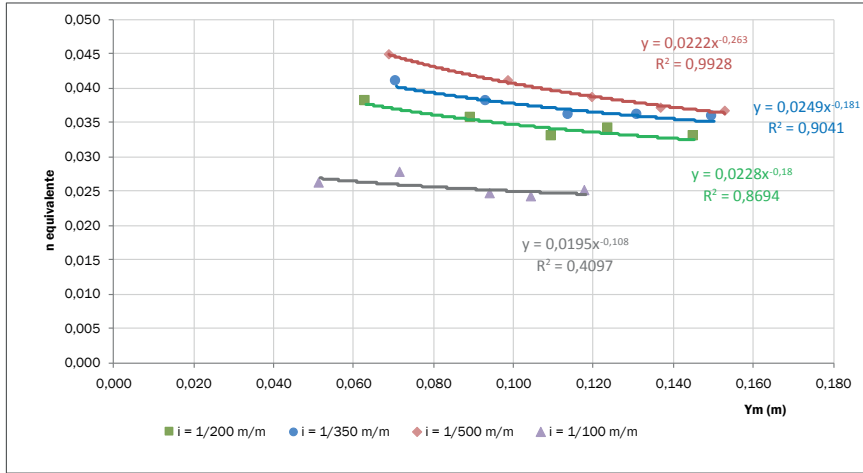


Gráfico 7 Altura da linha d'água versus η determinado

Fonte: Elaborado pelos autores.

Finalizando a análise do coeficiente de rugosidade equivalente do canal, compararam-se o estudo teórico (analítico) de Cordeiro *et al.* (2020), mencionado anteriormente como uma investigação do coeficiente de rugosidade de Manning da mesma placa sem a realização de simulações hidráulicas, e o estudo empírico (prático) que consistiu em uma das alternativas das simulações executadas, ambos para a mesma declividade de fundo $i = 0,010$ m/m. De acordo com o Gráfico 8, existem diferenças entre as curvas, demonstrando que, quando se trata de estudo de escoamentos, a abordagem empírica (prática) acaba prevalecendo com resultados mais realistas e, portanto, mais confiáveis que uma abordagem analítica.

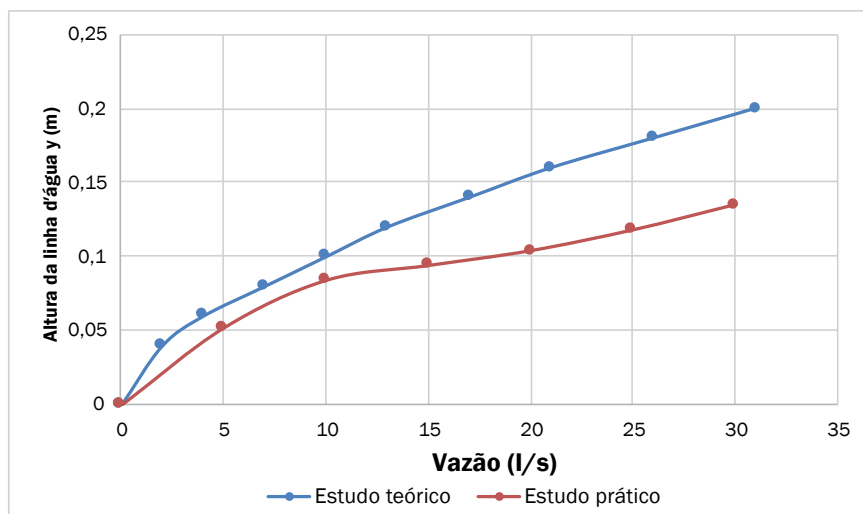


Gráfico 8 Comparação entre os estudos para declividade $i = 0,010$ m/m

Fonte: Elaborado pelos autores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A maioria das equações utilizadas no estudo dos escoamentos é empírica, resultante de inúmeras simulações idealizadas por muitos pesquisadores em laboratório, e estas têm grande aplicabilidade na engenharia hidráulica. As abordagens analíticas têm a sua importância, no entanto trabalham com hipóteses simplificadoras que acabam por alterar os resultados finais, e certamente foi o que ocorreu no estudo analítico de Cordeiro *et al.* (2020).

Contudo, nem todos os projetos podem contar com o auxílio de um modelo físico, seja por questões financeiras ou de tempo, e o modelo teórico poderia ser utilizado para substituir o modelo físico, com grau quase equivalente de confiabilidade dos resultados para esse tipo de análise, considerando uma estrutura vertente amplamente conhecida e estudada, de modo a proporcionar também uma análise visual do escoamento. Não se pode desqualificar um ou outro modelo, mas sim apresentá-los como ferramentas complementares que devem ser utilizadas de maneira conjunta pelo engenheiro hidráulico.

Canais com rugosidade composta são as situações mais frequentemente encontradas na vida prática da engenharia que aborda canais que conduzem águas pluviais, o que configura mais uma complexa variável no equacionamento de um problema de drenagem. Entender essa variação por meio de equações constitui-se em uma ferramenta útil para os profissionais que trabalham com esse tema.

STUDY OF THE ROUGHNESS COEFFICIENT ON A LABORATORY CHANNEL USING ROUGHNESS BACKGROUND

Abstract

The hydraulic engineering seeks for years the understanding of factors that influence the water flow and one of the most intriguing, undoubtedly, is the roughness coefficient. This work aims to study the effects of roughness in a didactic channel, equipped with roughness plates in its bed, through flow tests, by changing the flow rate and bottom slope. From these investigations, together with the elaboration of charts, it was possible to raise equations that relate the roughness coefficient with the flow rate and the height of the water line for each simulated bottom slope, which in most cases presented an acceptable correlation. Still in this study, the resulting key curve for the 1% slope was compared with the key curve resulting from the analytical study performed for the same channel, using the same roughness plate, showing the empirical study to be distinct from the analytical study.

Keywords: Manning's coefficient. Didactic channel. Roughness background.

REFERÊNCIAS

BAPTISTA, M.; LARA, M. *Fundamentos de engenharia hidráulica*. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 473 p.

CORDEIRO, B. *et al. Análise da resistência ao escoamento de canal hidráulico de laboratório através da instalação de placas de rugosidade*. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2020.

PIMENTA, C. F. *Curso de hidráulica geral*. 3. ed. São Paulo: Guanabara Dois, 1981. v. 2, 435 p.

PORTO, R. de M. *Hidráulica básica*. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 519 p.

SILVA, Ú. R. L. da; RODRIGUES, J. O.; TAVARES, P. R. L. *Determinação do coeficiente de Manning em canal experimental*. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, 2013.

Contato

Liliane Frosini Armelin

E-mail: liliane.armelin@mackenzie.br

Tramitação

Recebido em: 28/01/2023

Aprovado em: 28/03/2023