



**CANAIS COM
ESCOAMENTO
PERMANENTE E
UNIFORME**

**CONHECIMENTO É
UMA FORMA DE
CRIAR A
CONSCIENTIZAÇÃO
DA NOSSA
RESPONSABILIDADE
DE PRESERVAÇÃO**

**Em viagem a Sales, a 440
quilômetros da capital,
Sandra Mogami clicou o
filho Diego, de 5 anos,
nadando nas águas
cristalinas do Rio Tietê**



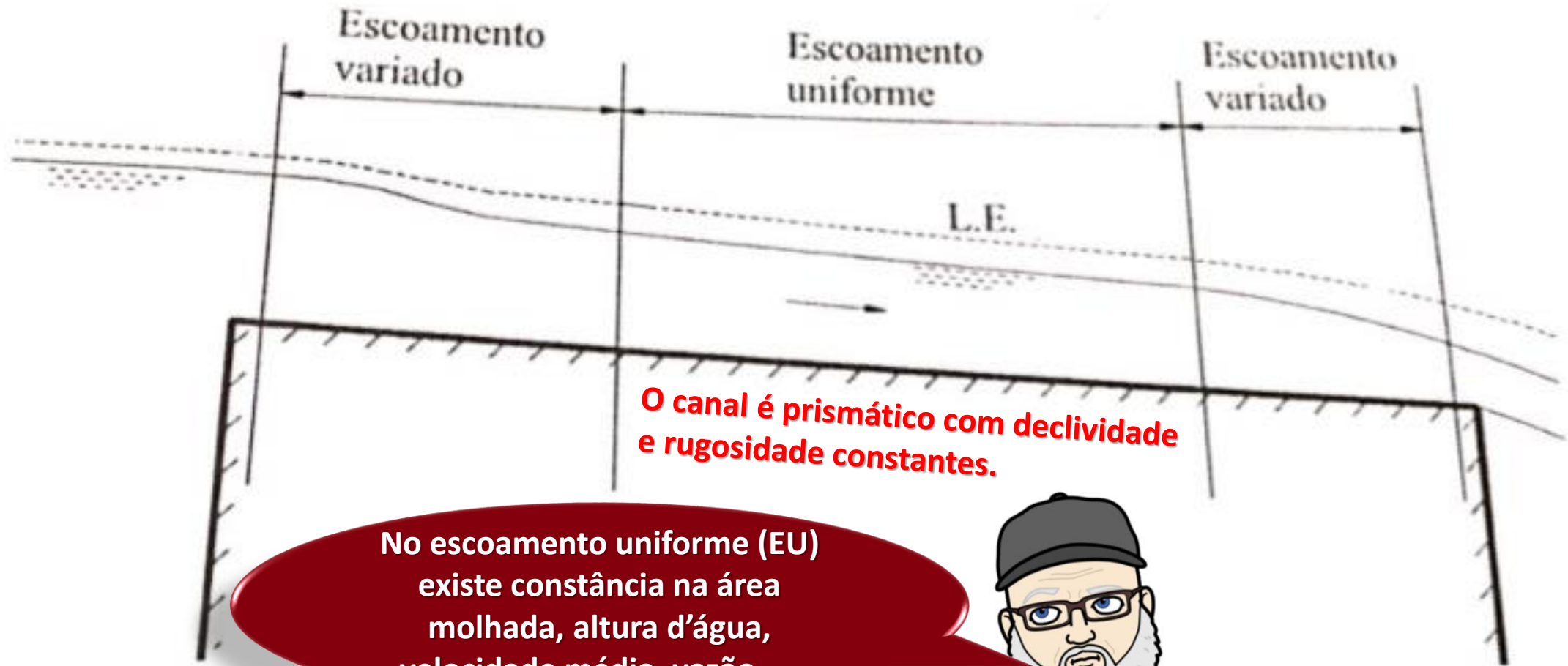
**Trecho do rio Tietê na região
de São Paulo**

**DEVEMOS DECIDIR O QUE
DESEJAMOS VER E SER NO
NOSSO AMANHÃ**



Iniciamos visualizando
o escoamento

No EU existe um equilíbrio dinâmico entre a força aceleradora e a força de resistência.



O canal é prismático com declividade e rugosidade constantes.

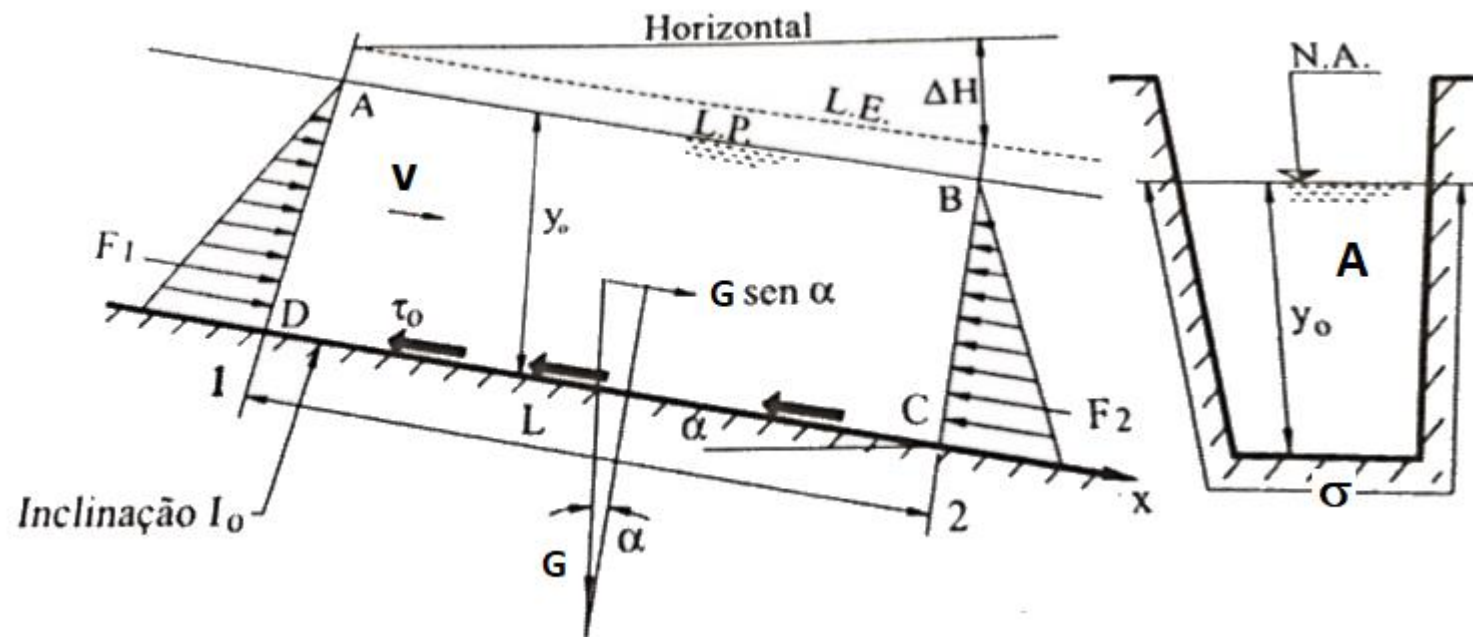
No escoamento uniforme (EU) existe constância na área molhada, altura d'água, velocidade média, vazão, ...



Supondo que as condições para o escoamento uniforme foram respeitadas, podemos afirmar que a força resistiva é originada por uma tensão entre a água e o perímetro molhado e depende da viscosidade do fluido, da rugosidade do canal e é função da velocidade média.

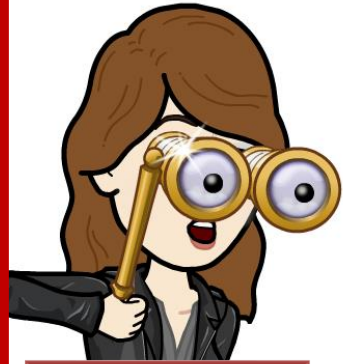


Hipótese: o canal é prismático de baixa declividade, com fronteiras rígidas (não sujeita à erosão) e a altura d'água, que é constante, é o y_0 chamada de altura natural.

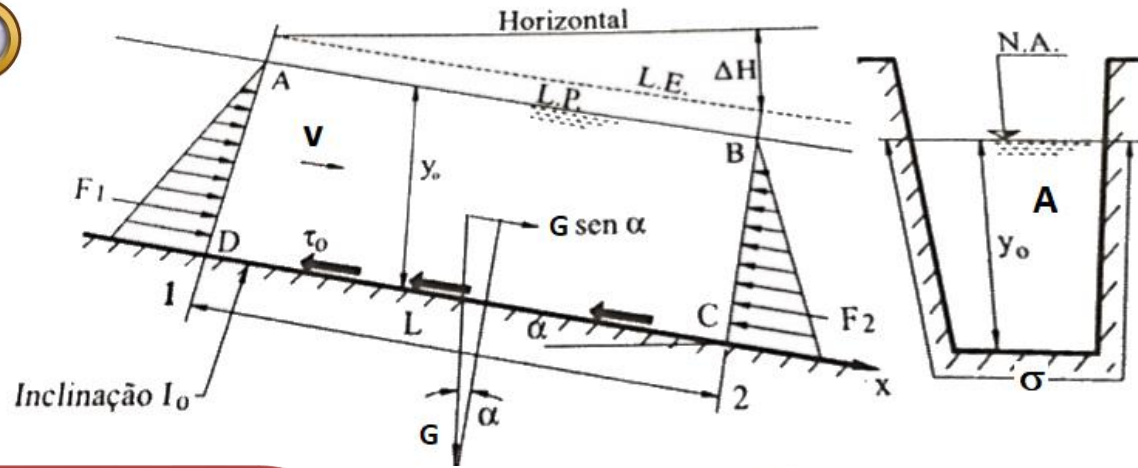


Já a força aceleradora é a componente da força da gravidade na direção do escoamento.





$$\sum_{ABCD} F = 0$$



$$\sum_{ABCD} F = 0$$

$$F_1 + G \times \text{sen} \alpha - F_2 - \tau_0 \times \sigma \times L = 0$$

$$y_0 = y_1 = y_2 = \text{cte}$$

$$\therefore F_1 = F_2$$



Considerando a massa fluida contida no volume de controle ABCD, podemos representar a condição de equilíbrio dinâmico como a somatória das forças que atuam no mesmo sendo nula.



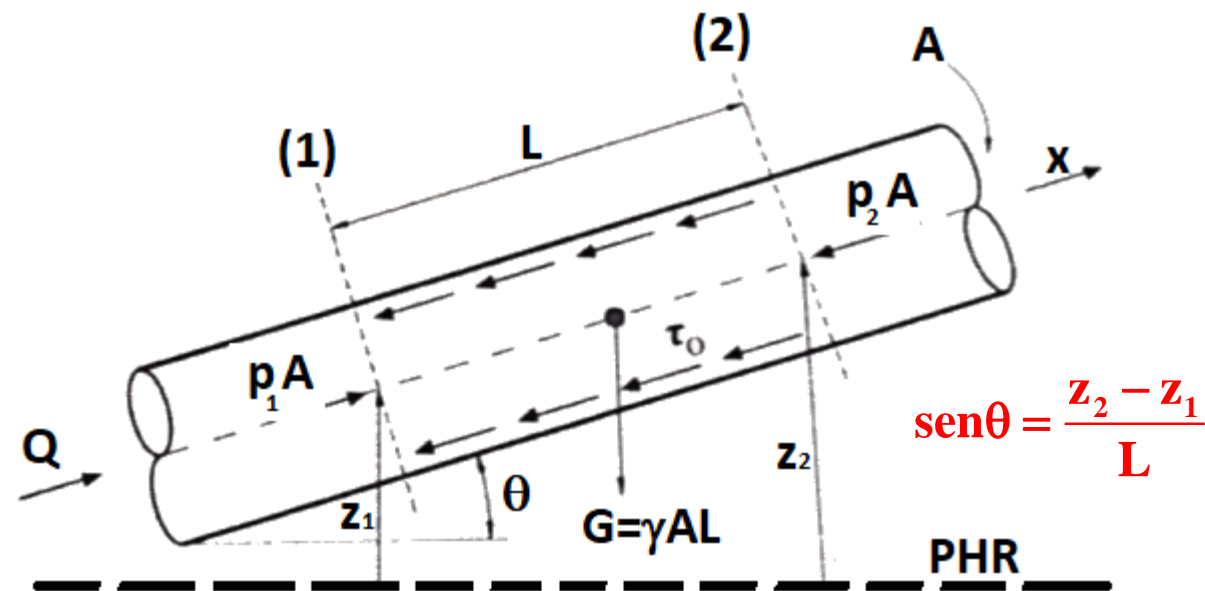
$$G \times \text{sen} \alpha = \tau_0 \times \sigma \times L \Rightarrow \tau_0 \times \sigma \times L = \gamma \times A \times L \times \text{sen} \alpha$$

$$\tau_0 = \gamma \times \frac{A}{\sigma} \times \text{sen} \alpha = \gamma \times R_H \times \text{sen} \alpha$$

$$\text{Para } \alpha < 6^\circ \Rightarrow \text{sen} \alpha \cong \text{tg} \alpha = \frac{\Delta z}{L} = I_0$$

$$\therefore \tau_0 = \gamma \times R_H \times I_0 \Rightarrow (I)$$

Diferente dos canais, onde na seção a pressão tem uma distribuição hidrostática, nos condutos forçados a pressão, em cada seção, é considerada constante.



Vamos evocar esta situação em um conduto forçado, ou seja, aquele que tem pressão diferente da pressão atmosférica.



$$\sum F_x = 0$$

$$p_1 A - p_2 A - \tau_0 \times \sigma \times L - G \times \text{sen}\theta = 0$$

$$(p_1 - p_2) A - \tau_0 \times \sigma \times L - \gamma \times A \times L \times \text{sen}\theta = 0$$

$$(p_1 - p_2) \frac{A}{\gamma \times A} - \frac{\tau_0}{\gamma} \times \frac{\sigma}{A} \times L - \frac{\gamma \times A}{\gamma \times A} \times (z_2 - z_1) = 0 \Rightarrow \left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) = \frac{\tau_0}{\gamma} \times \frac{L}{R_H}$$



Considerando escoamento incompressível, em regime permanente e aplicando a equação da energia de (1) a (2), resulta:

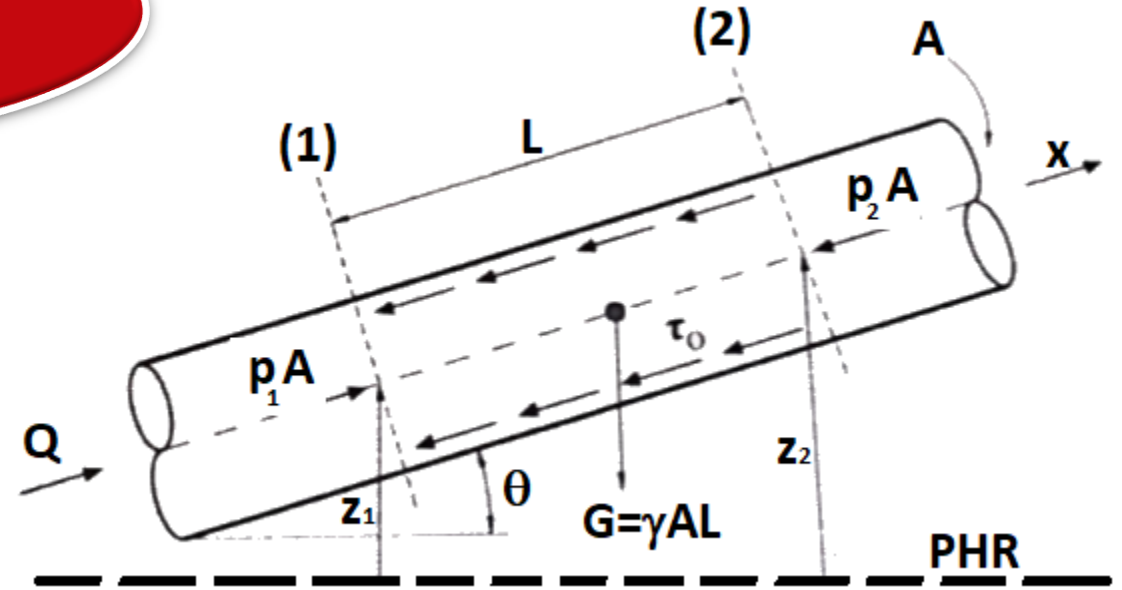
$$H_1 = H_2 + H_p$$

$$A_1 = A_2 \therefore v = \text{cte}$$

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) = H_p$$

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) = \frac{\tau_0}{\gamma} \times \frac{L}{R_H} \Rightarrow H_p = \frac{\tau_0}{\gamma} \times \frac{L}{R_H} \Rightarrow \text{no caso é uma perda distribuída}$$

$$f \times \frac{L}{D_H} \times \frac{v^2}{2g} = \frac{4 \times \tau_0}{\gamma} \times \frac{L}{D_H} \Rightarrow \tau_0 = \frac{f \times \gamma}{4} \times \frac{v^2}{2g} = \frac{f \times \rho \times v^2}{8} \Rightarrow \text{(II)}$$





Da equação
(I) e (II),
obtemos:

$$\tau_0 = \gamma \times R_H \times I_0 \Rightarrow \text{(I)}$$

$$\tau_0 = \frac{f \times \rho \times v^2}{8} \Rightarrow \text{(II)}$$

$$\frac{f \times \rho \times v^2}{8} = \gamma \times R_H \times I_0 \Rightarrow v^2 = \frac{8 \times \gamma}{f \times \rho} \times R_H \times I_0 \therefore v = \sqrt{\frac{8 \times g}{f}} \times \sqrt{R_H} \times \sqrt{I_0}$$

Chézy considerou que o escoamento se encontrava na região do escoamento hidraulicamente rugoso, onde f só depende da rugosidade, o que resultou:

$$C = \sqrt{\frac{8 \times g}{f}} \Rightarrow \text{coeficiente de resist\^encia ou}$$

coeficiente de rugosidade de Chézy

Portanto em 1775:
$$v = C \times \sqrt{R_H} \times \sqrt{I_0}$$

Antoine Léonard Chézy



Observe que na região do hidraulicamente rugoso o "f" fica constante com a variação do Reynolds, isto demonstra que ele não depende da vazão.

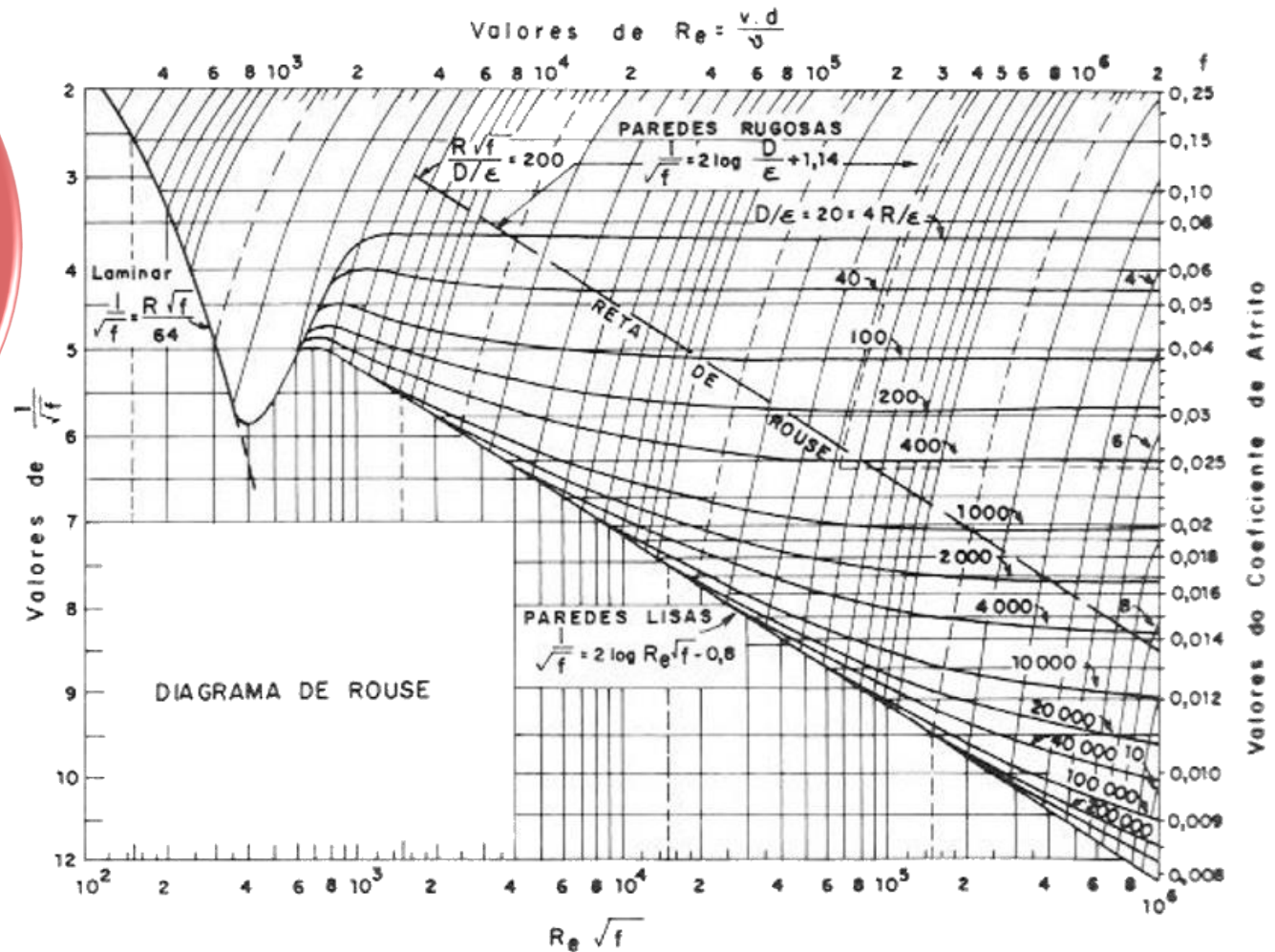
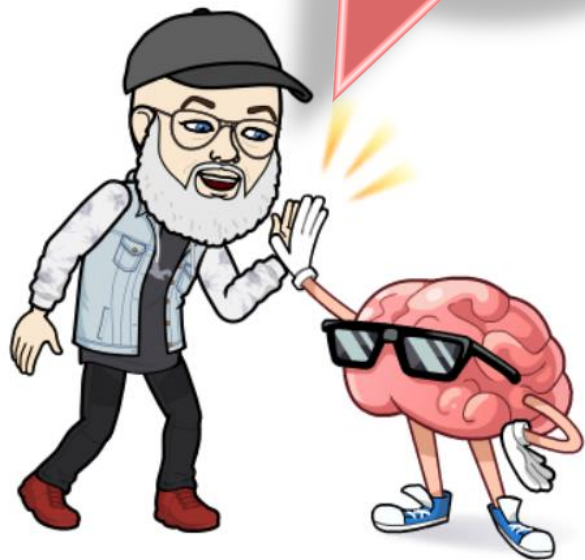


Diagrama de Rouse. Fonte: Macintyre

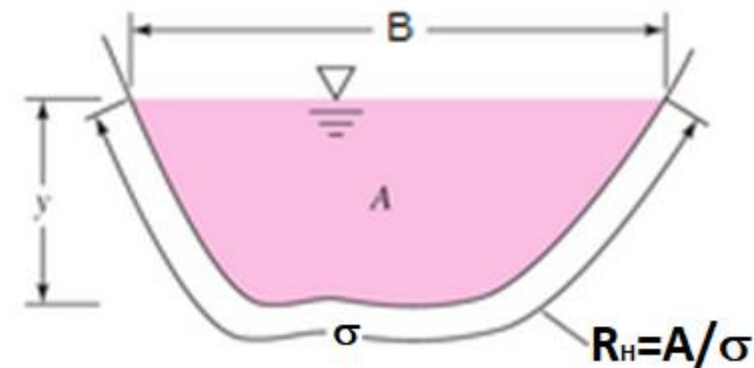
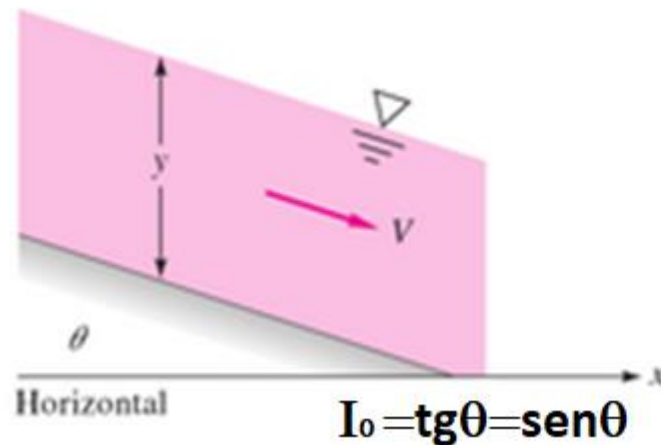
Sintetizando

Tanto para utilizar o Reynolds como o Froude, devemos saber obter a velocidade média do escoamento e para isto, recorreremos inicialmente a fórmula de Chézy.

$$v = C \times \sqrt{R_H \times I_0}$$

$$I_0 = \text{tg}\theta \approx \text{sen}\theta$$

$$C = \sqrt{\frac{8 \times g}{f}}$$



Os cálculos de escoamentos uniformes são diretos, se as geometrias forem simples. Os resultados são independentes da densidade e da viscosidade da água porque o escoamento é hidraulicamente rugoso e originado pela gravidade.

Como os canais típicos são grandes e rugosos, usa-se em geral, o limite de escoamento turbulento hidraulicamente rugoso, onde:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{D_H}{K} + 1,14$$

K ou ε → rugosidade equivalente valores tabelados

Vamos exercitar nosso cérebro e ampliar nossa inteligência.



Problema 4: Um canal reto e retangular tem 1,8 m de largura e 0,9 m de profundidade e está com uma declividade de 2°. O coeficiente de atrito (coeficiente de perda de carga distribuída) é 0,022. Estime a vazão para o escoamento uniforme em metros cúbicos por segundo. Estime a rugosidade equivalente e classifique o escoamento através dos números de Reynolds e Froude. Dado: viscosidade d'água igual a 10⁻⁶ m²/s.

Respostas: Q = 12,124 m³/s; K = 2,85 mm; Re = 13469400 (turbulento) e Fr = 2,52 (supercrítico ou torrencial)



FÓRMULA DE MANNING (1890)

Manning através da análise de resultados experimentais obtidos por ele e outros pesquisadores, chegou a relação empírica:

$$C = \frac{R_H^{1/6}}{n}$$

Ao considerá-la na equação de Chézy, resulta:

$$v = C \times \sqrt{R_H} \times \sqrt{I_0} = \frac{1}{n} \times R_H^{6^{1/6} + 1/2} \times \sqrt{I_0}$$

$$v = \frac{1}{n} \times R_H^{2/3} \times \sqrt{I_0} \text{ ou } \frac{n \times Q}{\sqrt{I_0}} = A \times R_H^{2/3}$$

Esta equação será a base de cálculo para problemas de escoamentos livres.

Sintetizando

Fórmula de Chézy com o coeficiente de Manning : em testes com canais reais, o engenheiro irlandês Robert Manning descobriu que o coeficiente de Chézy C aumentava aproximadamente com a raiz sexta do tamanho do canal. Ele propôs a fórmula no SI:

$$C = \sqrt{\frac{8 \times g}{f}} = \frac{\sqrt[6]{R_H}}{n} \Rightarrow v = \frac{a}{n} \times \sqrt[3]{R_H^2} \times \sqrt{I_0}$$

$$Q = v \times A \Rightarrow Q = \frac{a}{n} \times \sqrt[3]{R_H^2} \times \sqrt{I_0} \times A$$

A CONSTANTE “a” DAS EQUAÇÕES AO LADO É UM FATOR DE CONVERSÃO NO SI $a = 1 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ E NO SISTEMA INGLÊS COMO $1 \text{ m} = 3,2808 \text{ ft}$, TEMOS UM NOVO VALOR PARA A CONSTANTE a , QUE SERIA $a = 1,4859 \text{ ft}^{1/3}/\text{s}$

Alguns valores experimentais do coeficiente de Manning e da altura média da rugosidade ϵ em mm

Canais artificiais revestidos	$n \left(\frac{s}{m^{1/3}} \right)$	ϵ (mm)
vidro	0,010 ± 0,002	0,3
latão	0,011 ± 0,002	0,6
Aço, liso	0,012 ± 0,002	1,0
Aço, pintado	0,014 ± 0,003	2,4
Aço, rebitado	0,015 ± 0,002	3,7
Ferro fundido	0,013 ± 0,003	1,6
Concreto com acabamento	0,012 ± 0,002	1,0
Concreto sem acabamento	0,014 ± 0,002	2,4
Madeira aplainada	0,012 ± 0,002	1,0
Tijolo de barro	0,014 ± 0,003	2,4
Alvenaria	0,015 ± 0,002	3,7
Asfalto	0,016 ± 0,003	5,4
Metal corrugado	0,022 ± 0,005	37

Tabela – extraída do livro Mecânica dos Fluidos de Frank M. White – pg 463

Alguns valores experimentais do coeficiente de Manning e da altura média da rugosidade ϵ em mm		
Canais artificiais revestidos	$n \left(\frac{s}{m^{1/3}} \right)$	ϵ (mm)
Pedra argamassa	$0,025 \pm 0,005$	80
Canais escavados em terra:		
limpos	$0,022 \pm 0,004$	37
com cascalho	$0,025 \pm 0,005$	80
Com vegetação rasteira	$0,030 \pm 0,005$	240
pedregosos	$0,035 \pm 0,010$	500
Canais naturais:		
Limpos e retos	$0,030 \pm 0,005$	240
Lentos, com partes profundas	$0,040 \pm 0,010$	900
Rios principais	$0,035 \pm 0,010$	500

Tabela – extraída do livro Mecânica dos Fluidos de Frank M. White – pg 463

Alguns valores experimentais do coeficiente de Manning e da altura média da rugosidade ε em mm em 1869, Manning em 1889		
Canais artificiais revestidos	$n \left(\frac{s}{m^{1/3}} \right)$	ε (mm)
Planícies de inundação:		
Pastagens, terras cultivadas	$0,035 \pm 0,010$	500
Cerrados leve	$0,05 \pm 0,02$	2000
Cerrado denso	$0,075 \pm 0,025$	5000
árvores	$0,15 \pm 0,05$?

Tabela – extraída do livro Mecânica dos Fluidos de Frank M. White – pg 463

Durante o século XIX e XX, um grande esforço da pesquisa em hidráulica foi dedicado à correlação do coeficiente de Chézy com a rugosidade, o formato e a declividade de vários canais abertos. Apareceram correlações devidas a Ganguillet e Kutter em 1869, Manning em 1890, Bazin em 1897 e Powel em 1950, sendo que até hoje a mais popular é a de Manning.

Páginas 273 e 274 do livro Hidráulica Básica – 4ª edição escrito por Rodrigo de Melo Porto

Tabela 8.5 Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning.

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 revestimento 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	0,011	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 pedra 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 aos taludes.....	0,025	0,030	0,035*	0,040
Canais com fundo de 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	0,050
4. Como em 3, águas baixas, declividade fraca.....	0,040	0,045	0,050	0,055
5. Como em 3, com vegetação e pedras.....	0,033	0,035	0,040	0,045
6. Como em 4, com pedras.....	0,045	0,050	0,055	0,060
7. Com margens espraiadas, pouca vegetação.....	0,050	0,060	0,070	0,080
8. Com margens espraiadas, muita vegetação.....	0,075	0,100	0,125	0,150

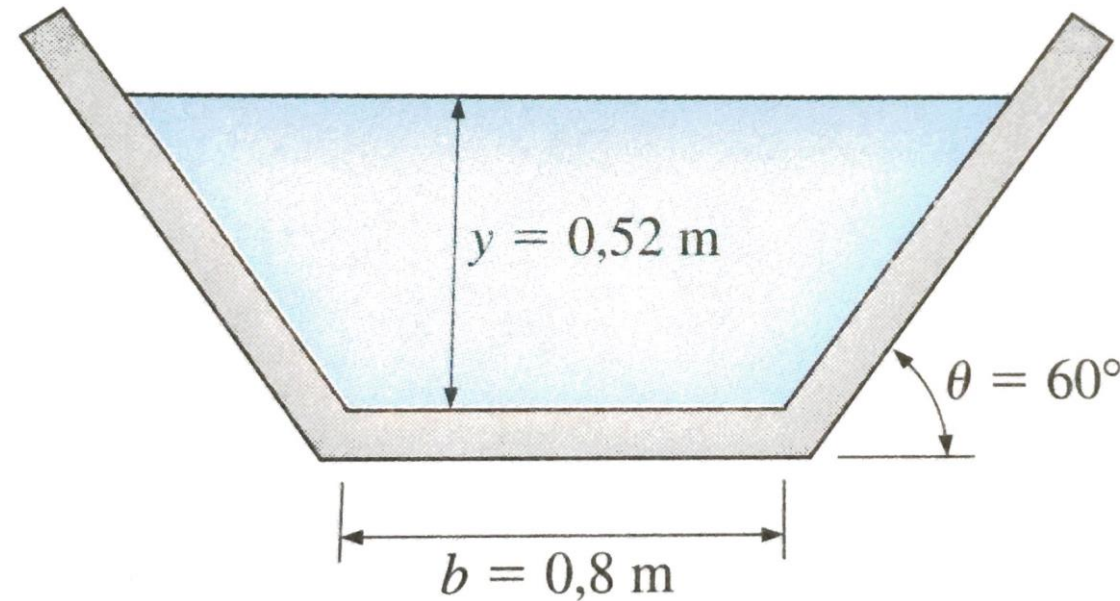
[n]
↓
 $\left(\frac{S}{m^{1/3}}\right)$

Tabela 8.6 Valores de n. (extraído de Bandini: *Hidráulica*, vol. 1).

Nº	Natureza das Paredes	n
01	Canais de chapas com rebites embutidos, juntas perfectas e águas limpas. Tubos de cimento e de fundição em perfectas condições.....	0,011
02	Canais de cimento muito liso, de dimensões limitadas, de madeira aplainada e lixada, em ambos os casos; trechos retilíneos compridos e curvas de grande raio e água limpa. Tubos de fundição usados.....	0,012
03	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
04	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
05	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
06	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
07	Canais com reboco de cimento incompleto, juntas irregulares, andamento tortuoso e depósitos no fundo; de alvenaria revestindo taludes não bem perfilados.....	0,017
08	Canais com reboco de cimento rugoso, depósitos no fundo, musgo nas paredes e traçado tortuoso.....	0,018
09	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.....	0,020
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

[n]
↓
 $\left(\frac{S}{m^{1/3}}\right)$

Problema 5: A água escoar em um canal escavado na terra coberto de vegetação rasteira com seção transversal trapezoidal e largura de fundo de 0,8 m, ângulo trapezoidal de 60° e ângulo de inclinação do fundo de $0,3^\circ$, como mostra a figura a seguir. Se a profundidade do escoamento medida for de 0,52 m, determine a vazão da água através do canal. Classifique o escoamento através do número de Reynolds e de Froude. Refaça o problema considerando que o ângulo do fundo foi alterado para 1° e mantidas as outras dimensões?. Dado: viscosidade d'água igual a $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$



Respostas: $Q \cong 0,719 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$; $Re \cong 1,44 \times 10^6 \Rightarrow$ turbulento; $Fr \cong 0,628 \Rightarrow$ subcrítico ou fluvial

Problema 6: Refaça o problema 5 considerando que o ângulo do fundo foi alterado para 1° e mantidas as outras dimensões?.

Problema 7: A água deve ser transportada em um canal retangular de concreto sem acabamento com uma largura da parte inferior de 1,22 m com uma vazão de $1,45 \text{ m}^3/\text{s}$. O terreno é tal que o fundo do canal cai 0,61 m a cada 304,8 m. Determine a profundidade do canal (y).



Resposta: a profundidade é aproximadamente 0,679 m

Problema 8: Qual seria sua resposta se a queda do fundo fosse de apenas 0,305 m para 152,4 m?

Exercite o cérebro e torne-se mais inteligente, mas não deixe de fazer isto de forma sustentável!

