Hidráulica 1 – SHS0409
HIDRÁULICA DOS CONDUTOS FORÇADOS

TIPOS DE ESCOAMENTO E PERDA DE CARGA

(AULA 2)

CONTEÚDO AULA 2

1. Tipos de escoamento

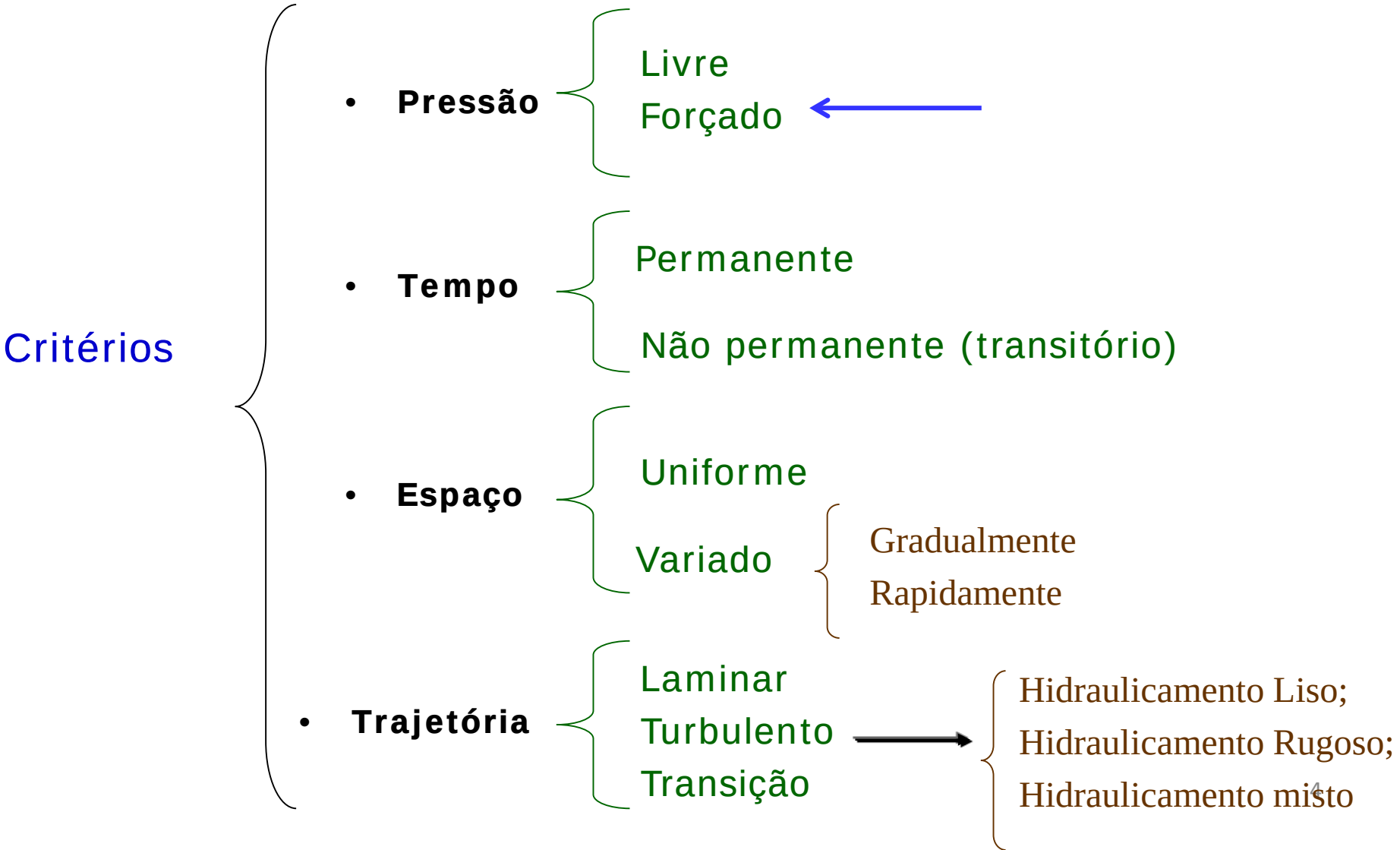
- Livre / forçado
- **Laminar / tubulento**

2. Escoamento em condutos forçados

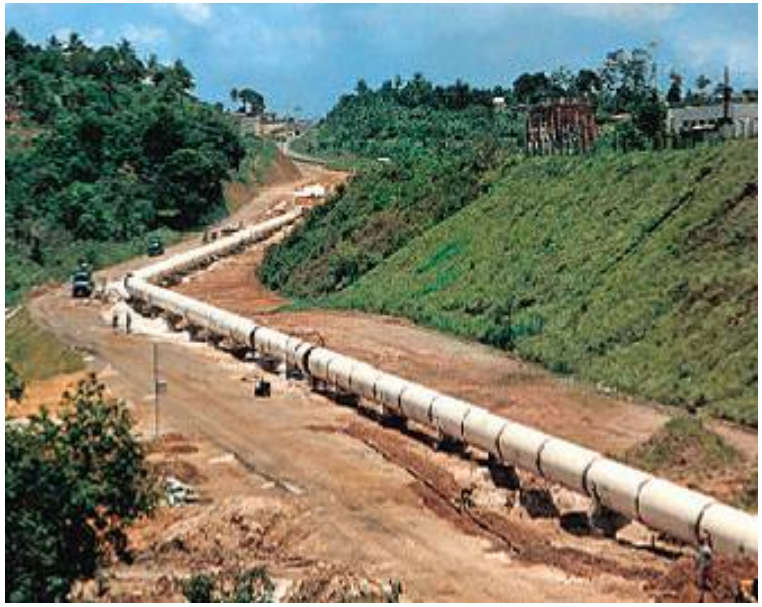
- FU da **perda de carga**– análise dimensional – definição ΔH definição de Rh e J (m/m)
- **Velocidade de atrito(**u*) **-** escoamento permante – tensão de cisalhamento...

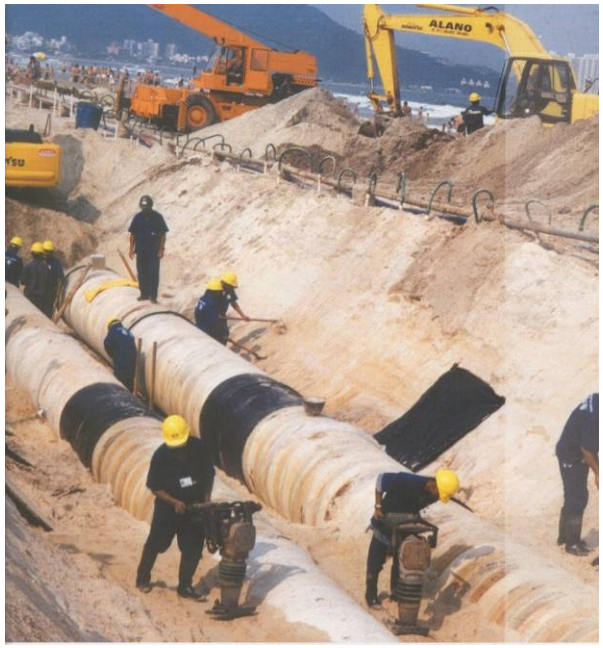
1. Tipos de escoamento

Tipos de escoamento critérios



CONDUTOS SOB PRESSÃO



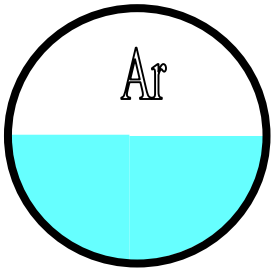


Figuras: Adutora de água operando como condutos forçados

CONDUTOS SOB PRESSÃO

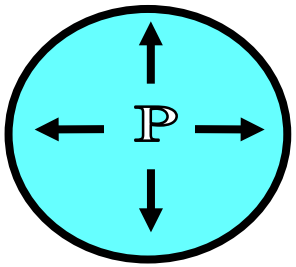
Denominam-se condutos sob pressão ou **condutos forçados**, as canalizações onde o líquido escoa sob uma pressão superior à atmosférica.

As seções desses condutos são sempre fechadas e o líquido escoa enchendo-as totalmente; são, em geral, de seção circular.



Conduto Livre

$P = P_{atm}$



Conduto forçado

$P > P_{atm}$

- Condutos forçados → seção plena, fechada, pressão maior que atmosférica, gravidade ou bombeamento.

- Condutos livres → seção aberta ou fechada, mas pressão na superfície é atmosférica, gravidade → rios, córregos, ribeirões, canais artificiais, galerias, etc.

Classificação dos escoamentos

Tempo e Espaço

Regimes de Escoamento

$$\frac{\partial V}{\partial s} = 0$$

- **Escoamento**
  - **Permanente** — ***Não*** *varia c/ o tempo* — *Q=cte*
    - **Uniforme** — ***Não*** *varia no Espaço* — *V=cte*
    - **Variado**
      - Gradualmente
      - Bruscamente
  - **Não Permanente** (transitórios) — *Varia com o tempo* — *Q≠cte*

Quanto a Direção da Trajetória

- **Escoamento Laminar**:

  As partículas descrevem trajetórias paralelas.

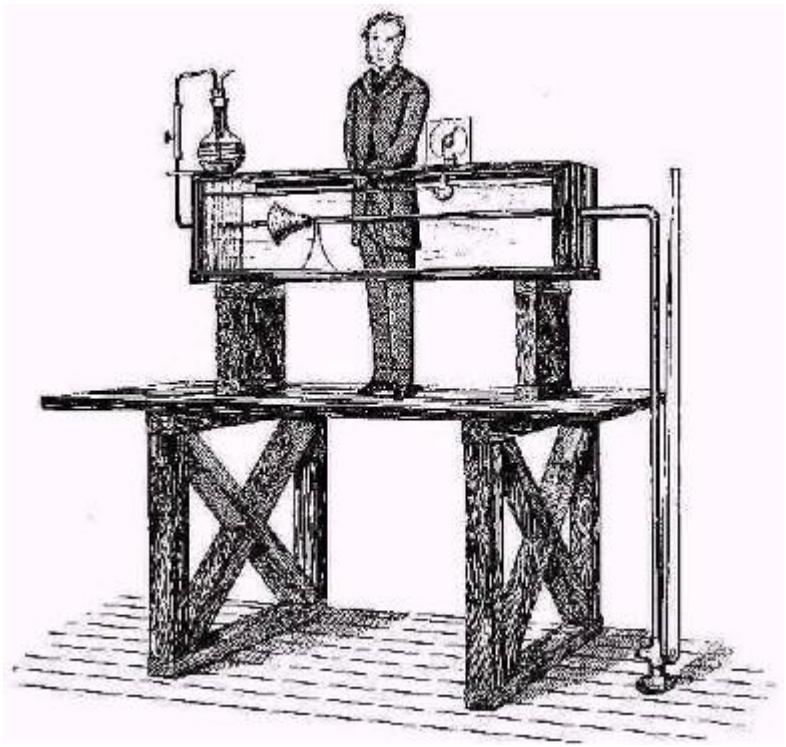
- **Escoamento Turbulento:**

  As trajetórias são errantes e cuja previsão é impossível;

- **Escoamento de Transição**:

  Representa a passagem do escoamento laminar para o turbulento ou vice-versa.

Classificação do Escoamento Experimento de Reynolds

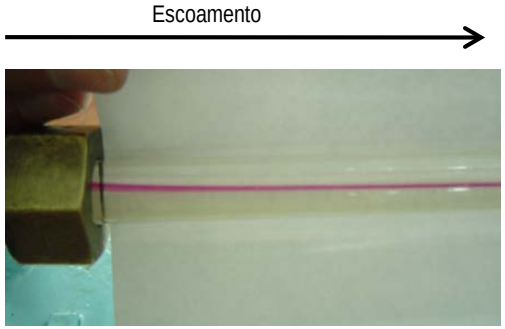


- Consiste na injeção de um corante líquido na posição central de um escoamento de água interno a um tubo circular de vidro transparente

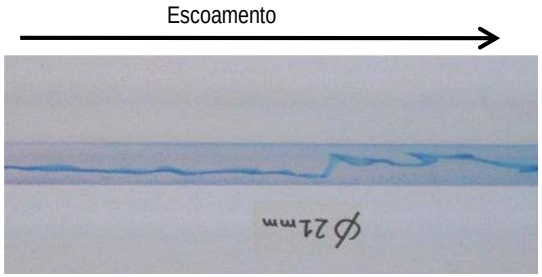
- O comportamento do filete de corante ao longo do escoamento no tubo define três características distintas

Classificação do Escoamento Experimento de Reynolds

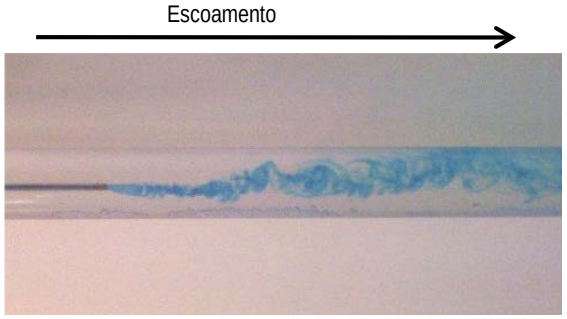
- Escoamento Laminar



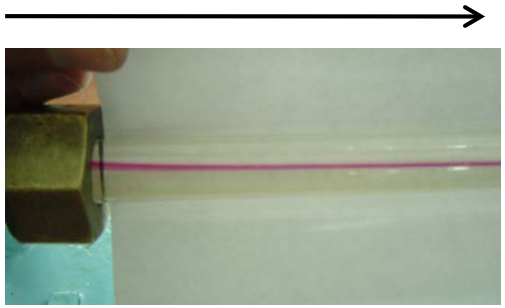
- Escoamento de Transição



- Escoamento Turbulento



Classificação do Escoamento Experimento de Reynolds



Regime Laminar:

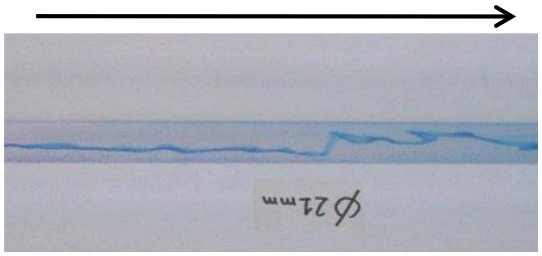
•O corante não se mistura com o fluido, permanecendo na forma de um filete no centro do tubo;

•O escoamento processa-se sem provocar mistura transversal entre escoamento e o filete, observável de forma macroscópica;

•Como “não há mistura”, o escoamento aparenta ocorrer como se lâminas de fluido deslizassem umas sobre as outras;

Classificação do Escoamento Experimento de Reynolds

Regime de Transição:



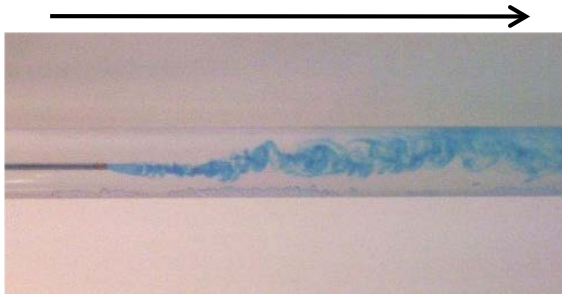
- O filete apresenta alguma mistura com o fluido, deixando de ser retilíneo sofrendo ondulações;

- Essa situação ocorre para uma pequena gama de velocidades e liga o regime laminar a outra forma mais caótica de escoamento;

- Foi considerado um estágio intermediário entre o regime laminar e o turbulento;

Classificação do Escoamento Experimento de Reynolds

Regime Turbulento:



•O filete apresenta uma mistura transversal intensa, com dissipação rápida;

•São perceptíveis movimentos aleatórios no interior da massa fluida que provocam o deslocamento de moléculas entre as diferentes camadas do fluido (perceptíveis macroscopicamente);

•Há mistura intensa e movimentação desordenada;

Classificação do Escoamento
Experimento de Reynolds

Reynolds observou que o fenômeno estudado dependia das seguintes variáveis:

ρ – massa específica do fluido;

v – velocidade média do escoamento;

D – diâmetro interno da tubulação;

μ – viscosidade do fluido.

Classificação do Escoamento Experimento de Reynolds

Aplicando a análise dimensional, obteve o adimensional:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

Velocidade

Resistivas

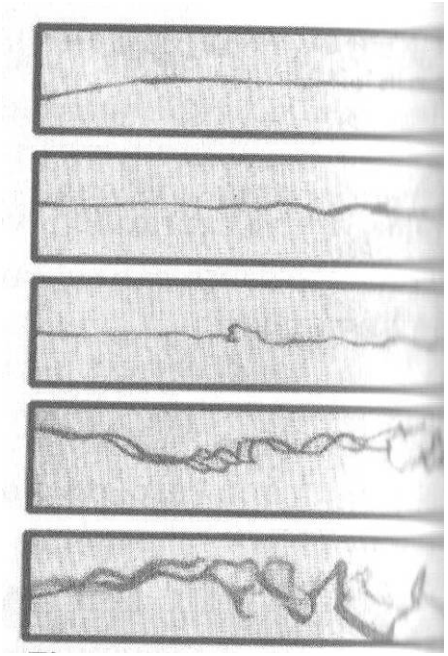
$\mathrm{Re} \leq 2000$: Escoamento Laminar

$2000 < \mathrm{Re} < 4000$: Escoamento de Transição

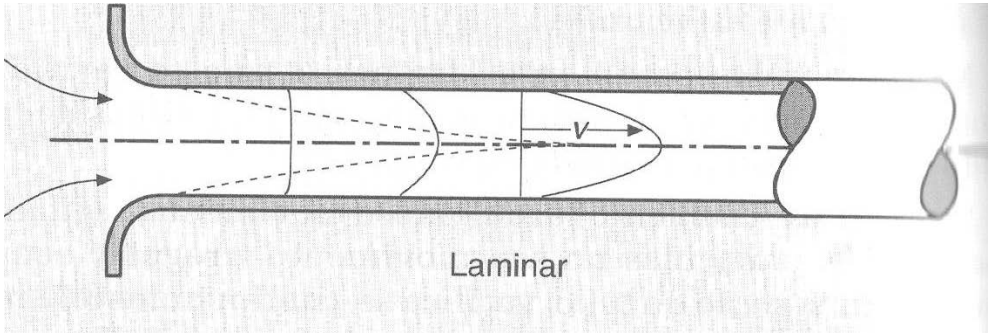
$\mathrm{Re} \geq 4000$: Escoamento Turbulento

CONDUTOS FORÇADOS

- Regimes de escoamento → LAMINAR
  - **Para Re < 2000 a 2500:** o escoamento se dá por filetes paralelos → "lâminas" → laminar ou lamelar → as partículas descrevem movimentos paralelos ao sentido do escoamento → mas a velocidade entre elas é diferente → assim existe o atrito entre essas camadas → no contato entre o fluído e a parede do conduto a velocidade é próxima a zero.



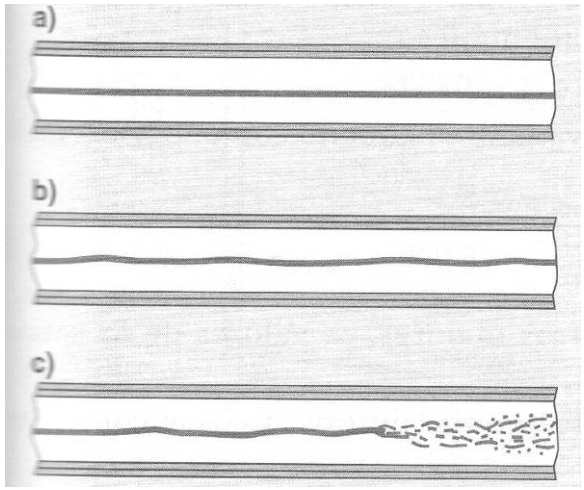
Reynolds aumenta → turbulência aumenta



CONDUTOS FORÇADOS

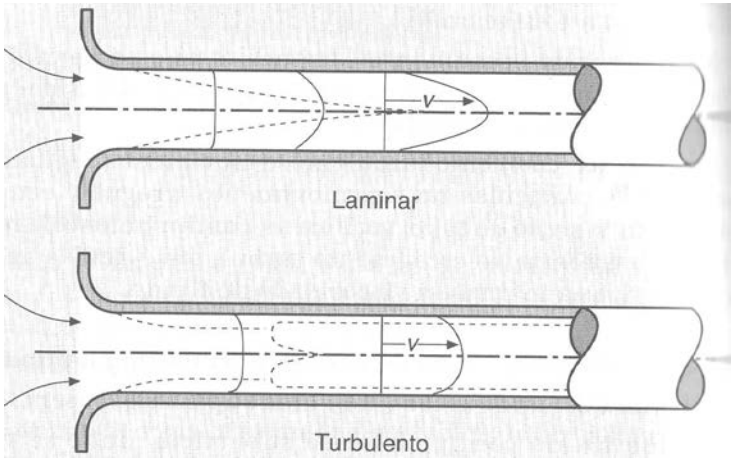
- Regimes de escoamento → TURBULENTO
  - **Para Re > 2000 a 2500:** as partículas não descrevem trajetórias regulares e retilíneas → ocorre turbulência → movimentos transversais das partículas → além das forças viscosas (do caso laminar), existe atrito devido aos movimentos transversais que geram perdas maiores.
  - Entre o movimento laminar e o turbulento existe uma zona de transição cujas características são variáveis com a rugosidade das paredes (ε/D).
  - Mesmo no regime turbulento, existe uma camada chamada **filme laminar** junto às paredes do conduto onde o escoamento é viscoso:
    - Se o "filme laminar" > ε → a rugosidade **não influi** na turbulência → **não influi** no valor de f → **Tubos Lisos**
    - Se o "filme laminar" < ε → a rugosidade **influi** na turbulência → **influi** no valor de f → **Tubos Rugosos**

CONDUTOS FORÇADOS



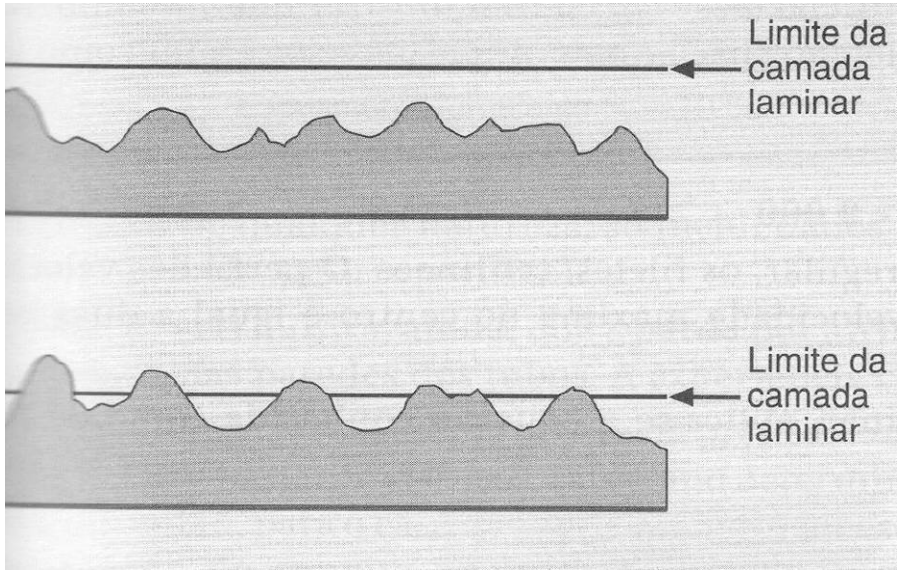
Laminar

Turbulento



Turbulento liso

Turbulento rugoso



2 Perda de de Carga

- Introdução..perda energia
- Definição da Perda de Carga

»Formula racional (F.U.)

Uma das equações de maior aplicação na hidráulica

Da equação de Euler → Escoamento permanente, incompressível e sem atrito ao longo de uma linha de corrente (LC)

Da equação integral da energia → permanente, incompressível, uniforme por seção e sem atrito → equação da energia

Estabelece uma relação entre velocidade, pressão e elevação

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = H$$

H → carga (energia) total por unidade de peso

V é a velocidade ao longo de uma LC ou a velocidade média (idealização de perfil uniforme)

Significado dos termos

$\frac{p}{\gamma}$ Energia ou carga de pressão

z Carga de posição (energia potencial em relação a uma referência ou *DATUM*)

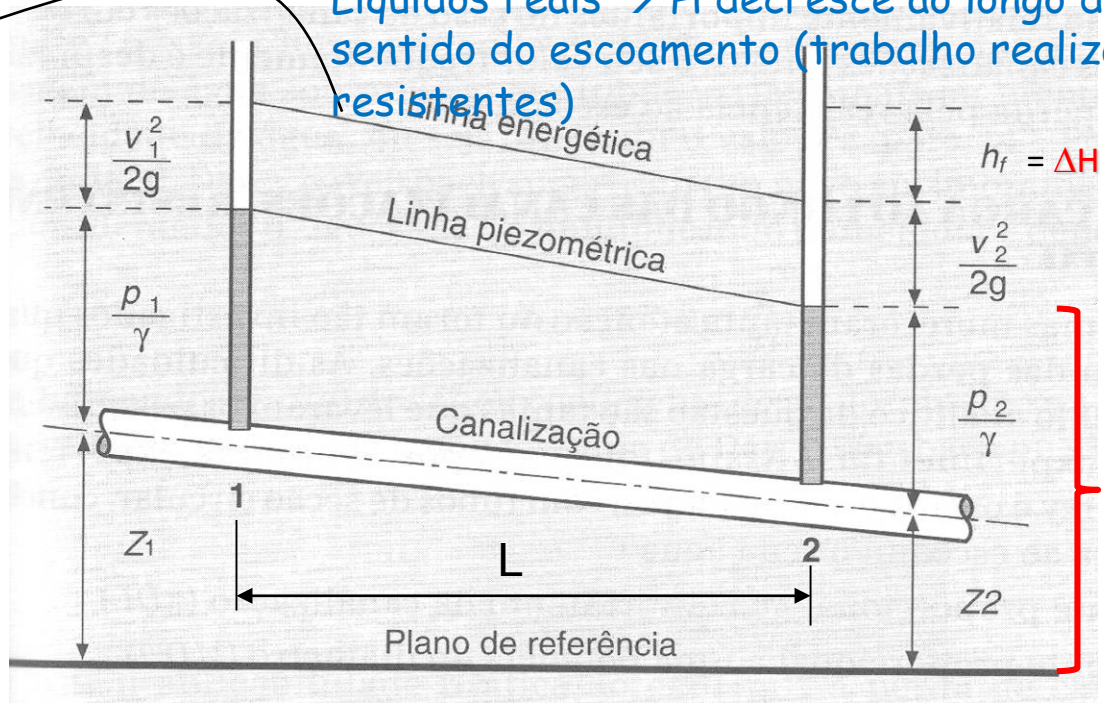
$\frac{V^2}{2g}$ Energia ou carga cinética

CONDUTOS FORÇADOS

- Teorema de Bernoulli → conservação da energia

$J = \Delta H/L$

Líquidos reais → H decresce ao longo da trajetória, nos sentido do escoamento (trabalho realizado pelas forças resistentes)



Carga piezométrica

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \Delta H$$

ΔH: perda de carga (perda de energia) por atrito em metros

$$\Delta H = JL \Rightarrow J = \frac{\Delta H}{L}$$

J: perda de carga unitária em m/m (declividade da linha de energia)

RELAÇÃO ENTRE PERDA DE CARGA UNITÁRIA E DECLIVIDADE DA LINHA PIEZOMÉTRICA

Denomina-se *perda de carga unitária*, $J(m/m) = \Delta H / L$, a relação entre a perda de carga ***ΔH*** e o comprimento ***L*** entre duas seções de uma tubulação.

Da figura ao lado, pode-se extrair a seguinte relação geométrica:

$$tg\,\alpha = \frac{\Delta H}{AC} = \frac{\Delta H}{L \cdot \cos\beta} = \frac{J}{\cos\beta} = J \cdot \sqrt{1 + tg^2\beta}$$

Esta expressão mostra que a inclinação da linha piezométrica em relação à horizontal é sempre maior que a perda de carga unitária J, a menos que a tubulação esteja na horizontal, situação em que as duas são iguais.

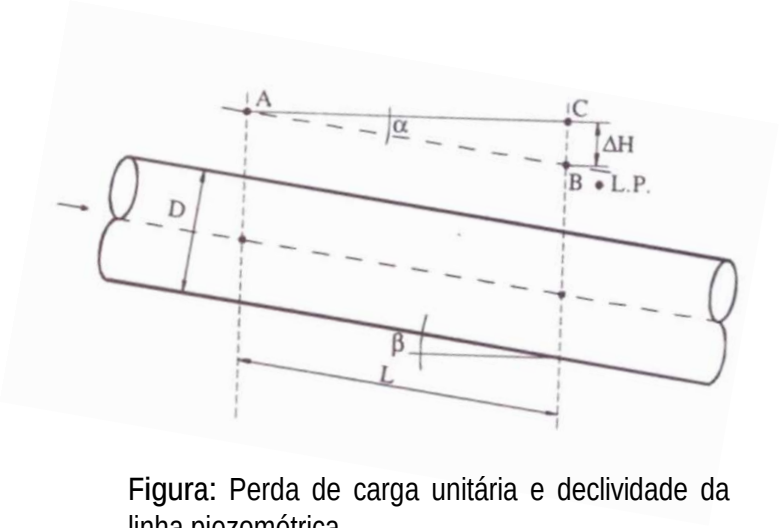


Figura: Perda de carga unitária e declividade da linha piezométrica.
Fonte: Porto, R.M. (1998).

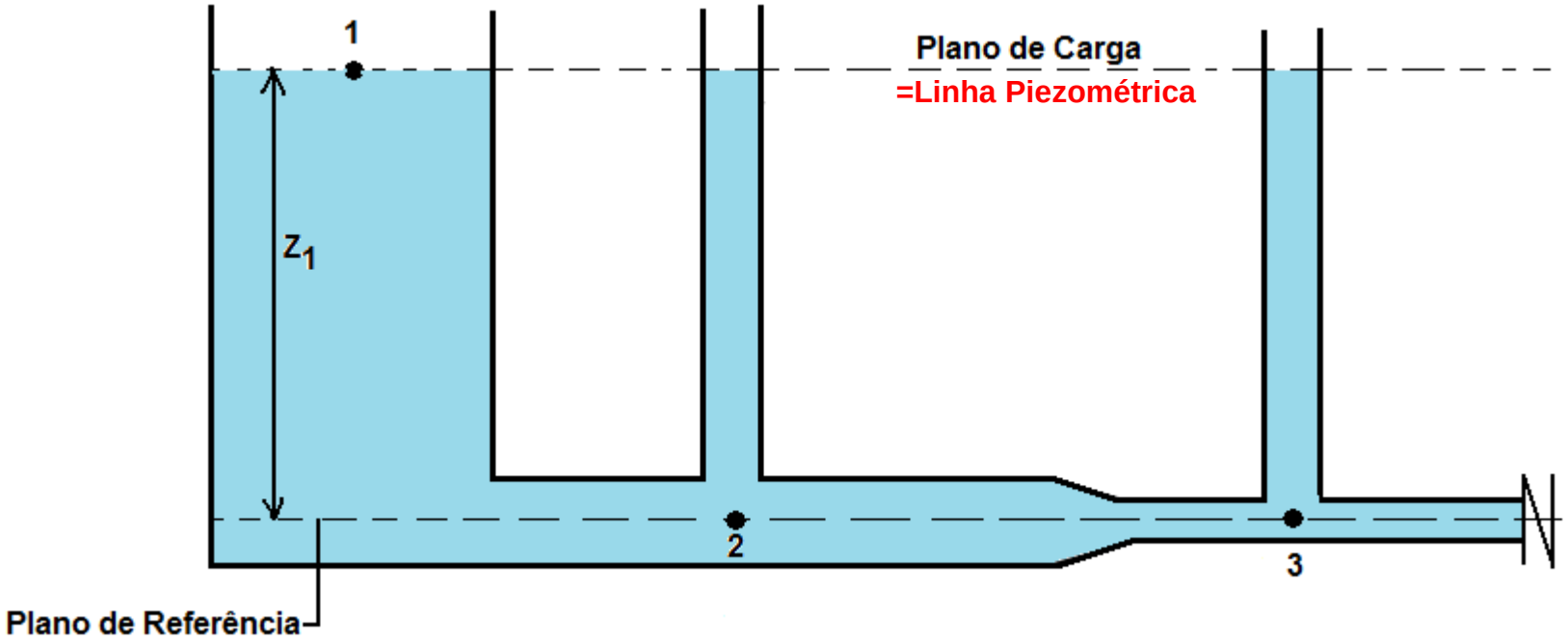
2.1. Perda de de Carga

- Definição da Perda de Carga

»Formula racional (F.U.)

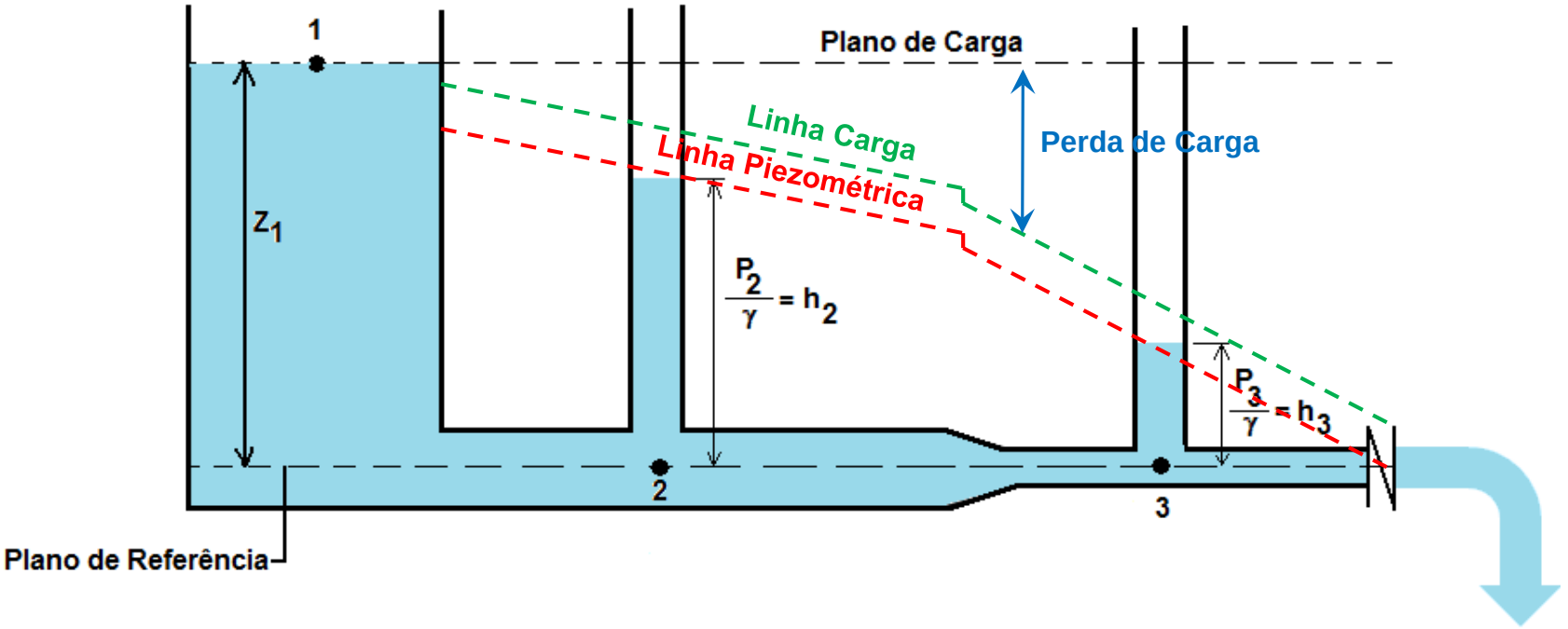
CONDUTOS SOB PRESSÃO

Pressão em Conduto Sem Escoamento



CONDUTOS SOB PRESSÃO

Pressão em Conduto Com Escoamento



PERDA DE CARGA
(Perda de Carga Contínua)

Perda de Carga Contínua: Distribuída ao longo do comprimento da canalização.

Ocorre devido ao atrito entre as diversas camadas do escoamento e ainda ao atrito entre o fluido e as paredes do conduto (efeitos da viscosidade e da rugosidade);

PERDA DE CARGA
(Perda de Carga Contínua)

Fatores determinantes:

- Comprimento da canalização;
- Diâmetro da canalização;
- Velocidade média do escoamento;
- Rugosidade das paredes dos canos.

Não influem:

- Posição da tubulação;
- Pressão interna.

PERDA DE CARGA (Contínua)

Análise Dimensional Aplicada ao Escoamento Forçado

Teorema de Vaschy-Buckingham (ou teorema dos Π):

"Todo fenômeno físico representado por uma relação dimensionalmente homogênea de *n* grandezas físicas, na forma: $F(G_1, G_2, \ldots G_k, \ldots G_n) = 0$, pode ser descrito por uma relação de *n-r* grupos adimensionais independentes $\phi(\pi_1, \pi_2, \ldots \pi_{n-r}) = 0$, em que *r* é o número de grandezas básicas ou fundamentais necessárias para expressar dimensionalmente as variáveis G_i."

PERDA DE CARGA (Contínua)

Análise Dimensional Aplicada ao Escoamento Forçado

Teorema de Vaschy-Buckingham (ou teorema dos Π):

Os 6 passos listados a seguir delineiam um procedimento recomendado para determinar os parâmetros Π:

1.Liste todos os parâmetros dimensionais envolvidos: Seja n o número de parâmetros.

2.Selecione um conjunto de dimensões fundamentais (primárias).

*3.Liste as dimensões de todos os parâmetros em termos das dimensões prim*árias: Seja *r* o número de dimensões primárias.

4.Selecione da lista um conjunto de r parâmetros dimensionais que inclua todas as dimensões primárias. Estes parâmetros juntos, chamados de parâmetros repetentes, serão combinados com cada um dos parâmetros remanescentes, um de cada vez. Nenhum dos parâmetros repetentes podem ter dimensões que sejam uma potência das dimensões de outro parâmetro repetente; por exemplo, não inclua um comprimento (L) e um momento de inércia (L^4), como parâmetros repetentes. Os parâmetros repetentes escolhidos podem aparecer em todos os grupos adimensionais obtidos; por isso, não inclua o parâmetro dependente entre aqueles selecionados neste passo.

5.Forme equações dimensionais, combinando os parâmetros selecionados no Passo 4 com cada um dos outros parâmetros remanescentes, um de cada vez, a fim de formar grupos dimensionais. (Haverá *n-m* equações). Resolva as equações dimensionais para obter os *n-m* grupos adimensionais.

6.Certifique-se de que cada grupo obtido é adimensional.

PERDA DE CARGA (Contínua)

Análise Dimensional Aplicada ao Escoamento Forçado

No fenômeno físico do escoamento de um líquido real, com velocidade média V caracterizado pela sua viscosidade dinâmica μ e massa específica ρ, através de uma tubulação circular de diâmetro D, comprimento L e coeficiente de rugosidade ε , onde se observa uma variação de pressão ΔP, pode ser tratada pelo Teorema dos π_s, na forma:

$$\Delta P = F(\rho, V, D, \mu, L, \varepsilon)$$

PERDA DE CARGA (Contínua)

Análise Dimensional Aplicada ao Escoamento Forçado

Teorema de Vaschy-Buckingham (ou teorema dos π):

$$\Delta P = F(\rho, V, D, \mu, L, \varepsilon)$$

Número Grandezas Físicas: n= 7

$$\overbrace{[M]\cdot[L]\cdot[t]^{-2}}^{\Delta P} \quad \overbrace{[M]\cdot[L]^{-3}}^{\rho} \quad \overbrace{[L]\cdot[t]^{-1}}^{V} \quad \overbrace{[L]}^{D} \quad \overbrace{[M]\cdot[t]\cdot[L]^{-2}}^{\mu} \quad \overbrace{[L]}^{L} \quad \overbrace{[L]}^{\varepsilon}$$

Número de Grandezas Básicas: r = 3 (M, L, t)

Número de Grupos Adimensionais: n - r = 7 – 3 = 4

n grandezas físicas,

r é o número de grandezas básicas

PERDA DE CARGA (Contínua)

Análise Dimensional Aplicada ao Escoamento Forçado

Teorema de Vaschy-Buckingham (ou teorema dos π):

$$\Pi_1 = \rho^a \cdot V^b \cdot D^c \cdot \Delta P$$

$$\left(\frac{M}{L^3}\right)^a \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^b \cdot (L)^c \cdot \left(\frac{M}{L \cdot t^2}\right)$$

M: $a + 1 = 0 \rightarrow a = -1$

L: $-3 \cdot a + b + c - 1 = 0 \rightarrow 3 - 2 + c - 1 = 0 \rightarrow c = 0$

t: $-b - 2 = 0 \rightarrow b = -2$

$$\Pi_1 = \rho^{-1} \cdot V^{-2} \cdot D^0 \cdot \Delta P$$

$$\Pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho \cdot V^2}$$

Número de Euler

PERDA DE CARGA (Contínua)

Análise Dimensional Aplicada ao Escoamento Forçado

Teorema de Vaschy-Buckingham (ou teorema dos π):

$$\Pi_2 = \rho^a \cdot V^b \cdot D^c \cdot \mu$$

$$\left(\frac{M}{L^3}\right)^a \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^b \cdot (L)^c \cdot \left(\frac{M}{L \cdot t}\right)$$

M: $a + 1 = 0 \rightarrow a = -1$

L: $-3 \cdot a + b + c - 1 = 0 \rightarrow 3 - 1 + c - 1 = 0 \rightarrow c = -1$

t: $-b - 1 = 0 \rightarrow b = -1$

$$\Pi_2 = \rho^{-1} \cdot V^{-1} \cdot D^{-1} \cdot \mu$$

$$\Pi_2 = \frac{\mu}{\rho \cdot V \cdot D} = \frac{1}{\mathrm{Re}}$$

Reynolds

PERDA DE CARGA (Contínua)

Análise Dimensional Aplicada ao Escoamento Forçado

Teorema de Vaschy-Buckingham (ou teorema dos π):

$$\Pi_3 = \rho^a \cdot V^b \cdot D^c \cdot L$$

$$\left(\frac{M}{L^3}\right)^a \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^b \cdot (L)^c \cdot (L)$$

M: $a = 0$

L: $-3 \cdot a + b + c + 1 = 0 \rightarrow 0 + 0 + c + 1 = 0 \rightarrow c = -1$

t: $-b = 0 \rightarrow b = 0$

$$\Pi_3 = \rho^0 \cdot V^0 \cdot D^{-1} \cdot L$$

$$\boxed{\Pi_3 = \frac{L}{D}}$$

PERDA DE CARGA (Contínua)

Análise Dimensional Aplicada ao Escoamento Forçado

Teorema de Vaschy-Buckingham (ou teorema dos π):

$$\Pi_4 = \rho^a \cdot V^b \cdot D^c \cdot \varepsilon$$

$$\left(\frac{M}{L^3}\right)^a \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^b \cdot (L)^c \cdot (L)$$

M: $a = 0$

L: $-3 \cdot a + b + c + 1 = 0 \rightarrow 0 + 0 + c + 1 = 0 \rightarrow c = -1$

t: $-b = 0 \rightarrow b = 0$

$$\Pi_4 = \rho^0 \cdot V^0 \cdot D^{-1} \cdot \varepsilon$$

$$\boxed{\Pi_4 = \frac{\varepsilon}{D}}$$

Rugosidade relativa

PERDA DE CARGA (Contínua)

Análise Dimensional Aplicada ao Escoamento Forçado

Portanto existe uma função adimensional na forma:

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot V^2} = \Phi\left(\frac{\mu}{\rho \cdot V \cdot D}, \frac{\varepsilon}{D}, \frac{L}{D}\right)$$

A experiência mostra que a queda de pressão é diretamente proporcional à relação L/D, logo a expressão torna-se:

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot V^2} = \frac{L}{D} \cdot \underbrace{F\left(\frac{\mu}{\rho \cdot V \cdot D}, \frac{\varepsilon}{D},\right)}_{f^*}$$

A função F pode ser óbtida experimentalmente obtendo-se *f*:*

$$\Delta P = \rho \cdot f^* \cdot \frac{L}{D} \cdot V^2$$

Como $\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h$, vem:

$$\Delta h = f^* \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{g}$$

PERDA DE CARGA (Contínua)

Análise Dimensional Aplicada ao Escoamento Forçado

Introduzindo o fator ½ para reproduzir a definição de carga cinética da equação de energia, obtém-se:

$$\Delta h = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Conhecida como ***fórmula universal de perda de carga*** ou ***equação de Darcy-Weisbach***, sendo:

- ***f*** : fator de atrito;
- ***L:*** comprimento da tubulação (m);
- ***D:*** diâmetro interno da tubulação (m);
- ***V:*** velocidade média do escoamento (m/s);
- ***g:*** aceleração da gravidade (m/s^2).

Deve-se observar que a aplicação dos Teorema dos Π_s não fornece a expressão analítica da função adimensional Φ, o que pode ser obtido, particularmente, por experimentação.

Equação da Perda de Carga Generalizada

- Substituindo V por Q

Equação da Perda de Carga Generalizada

- Substituindo V por Q
- Conceito de raio hidráulico (R_H)

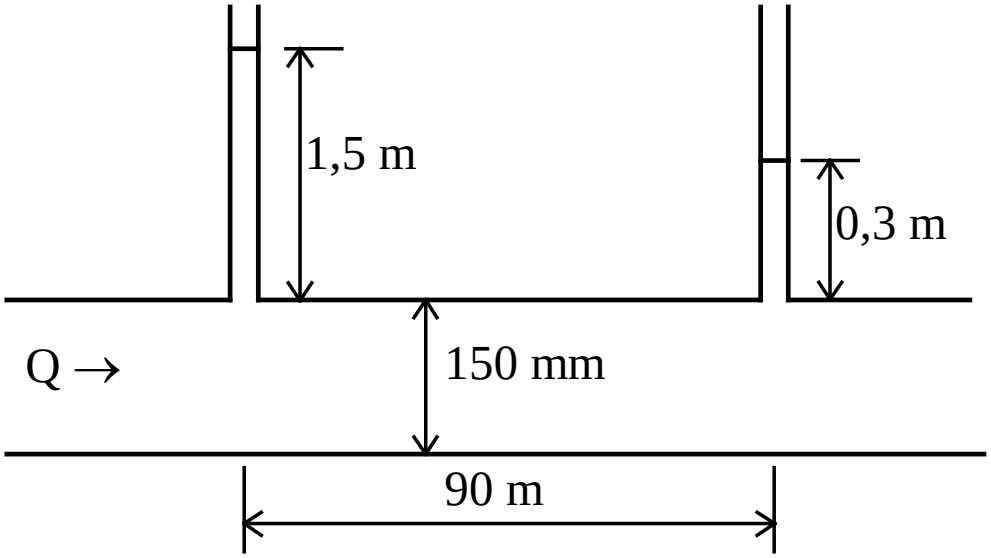
- $R_H = \frac{Área\ Molhada}{Perímetro\ Molhado}$

- Exemplos:
  - canal triangular
  - Conduto forçado circular

2 seções são hidraulicamente equivalentes se possuírem o mesmo (R_H)

Aplicação 1

1. Qual a vazão que passa através da tubulação de aço comercial de 150 mm de diâmetro mostrada na figura? Dado: ε = 0,05 mm



- Desafio: exercício 1.8

- Obrigada!