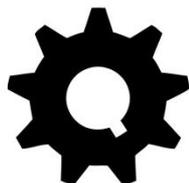




Instituto de Química
IQ - UFG



ENGENHARIA QUÍMICA
Universidade Federal de Goiás

Análise Dimensional e Similaridade

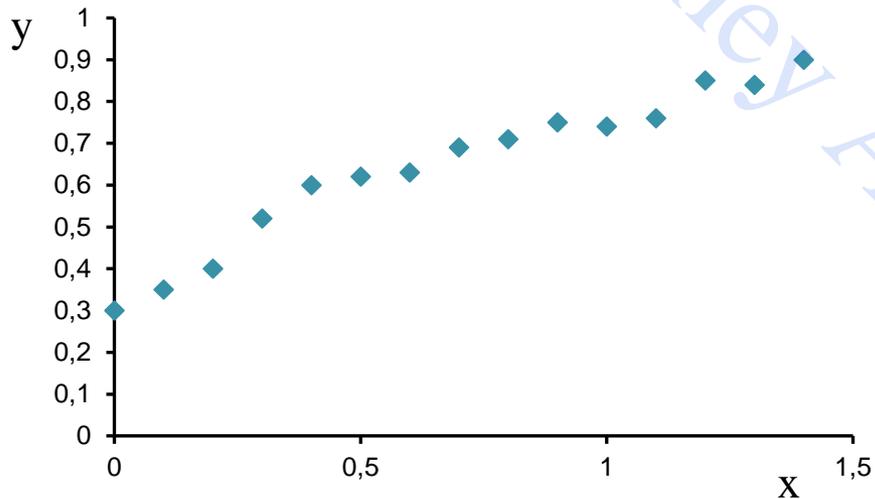
Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

6 . Análise Dimensional e Similaridade

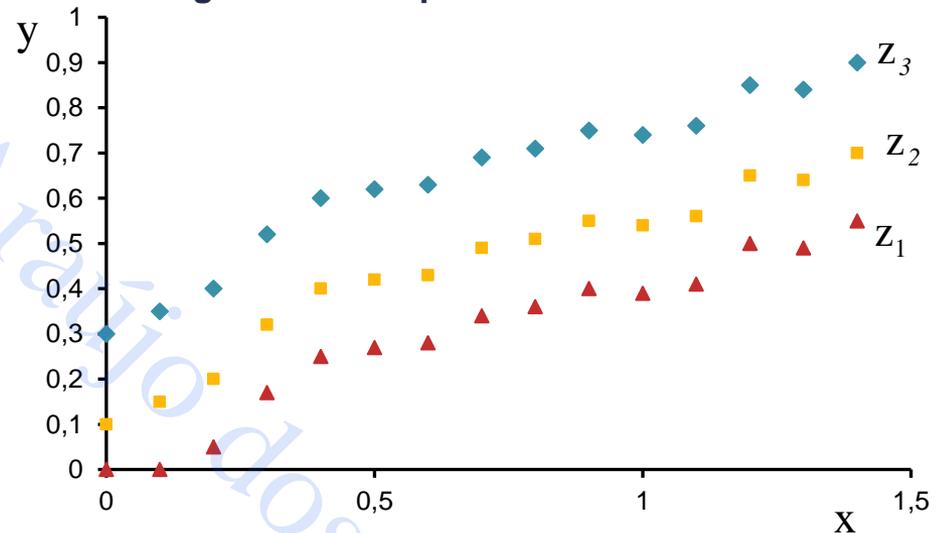
6.1 Introdução

Problemas complexos ou que não tenham uma teoria ainda bem posta podem ser tratados de forma empírica. Exemplos de como se obter, experimentalmente, correlações entre variáveis:

a) Se $y = y(x)$, pode-se variar x e medir y e, após obter um gráfico de dispersão, ajustar um modelo estatístico



b) Se $y = y(x, z)$, pode-se manter x constante, variar z e medir y e, após obter os dados, realizar uma regressão múltipla



OBS. 1: esta metodologia de “fixar e variar variáveis”, entretanto, é inadequada para um conjunto muito grande de variáveis, pois necessita de um número muito grande de experimentos para se obter uma correlação, ou seja, alto custo de matéria-prima e operação.

Solução: Utilizar a análise dimensional para encontrar os grupos adimensionais relevantes ao problema em questão e, desta forma, reduzir o número de experimentos necessários.

Análise Dimensional: Método para reduzir o número e a complexidade das variáveis experimentais que afetam um dado fenômeno físico, pela aplicação de um tipo de técnica de “compactação”.

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

Definição do Teorema π -Buckingham: teorema utilizado na Análise Dimensional para encontrar um conjunto de parâmetros adimensionais relevantes ao problema estudado a fim de simplificá-lo.

Etapas que compõem o Teorema de Buckingham

1^a Listam-se as variáveis relevantes ao problema em análise (n_v);

2^a Seleciona-se um sistema básico de dimensões (**M** = massa; **L** = comprimento; **T** = tempo; **θ** = temperatura);

3^a Constrói-se a matriz dimensional das variáveis envolvidas. Os elementos da matriz dimensional são os expoentes a que estão elevados cada um dos termos da representação dimensional da variável;

4^a Determina-se o rank (r) da matriz dimensional, que é a ordem do maior determinante não nulo subtendido pela matriz;

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

5^a Calcula-se o número de grupos adimensionais relevantes ao fenômeno (π grupos através da Equação abaixo):

$$n_{\pi} = n_v - r$$

6^a Escolhe-se o núcleo de variáveis que consiste de um subgrupo de r variáveis que deve necessariamente conter todas as dimensões envolvidas no problema;

Obs: É aconselhável, sempre que possível, escolher uma variável **geométrica**, uma **cinemática**, uma **dinâmica** e uma **térmica** para comporem o núcleo.

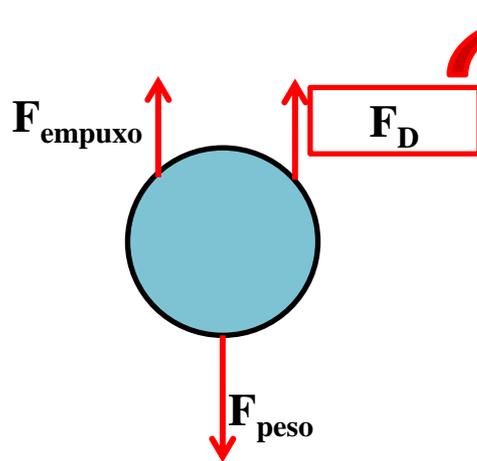
7^a Resolve-se o sistema de equações dimensionais obtidos a partir da combinação das variáveis que compõem o núcleo com cada uma das variáveis restantes e obtêm-se os π grupos;

8^a Verifica-se a independência dos grupos e realizam-se experimentos para correlacioná-los.

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

Exemplo 1: A Força de Arraste (F_D) que age sobre uma esfera em queda num fluido é função da velocidade de queda, V , da área projetada da esfera, A , da massa específica do fluido, ρ , e da viscosidade do fluido, μ . Determine os números adimensionais que podem ser usados para correlacionar dados experimentais.



i) Variáveis relevantes (n_v) e sistema básico de dimensões ($MLT\theta$)

F_D : força de arrasto [MLT^{-2}];

ρ : massa específica do fluido [ML^{-3}];

V : velocidade de queda [LT^{-1}];

μ : viscosidade do fluido [$ML^{-1}T^{-1}$];

A : área projetada da esfera [L^2];

Exemplos de dimensões de variáveis:

$$[F] = [m][a] = M \frac{L}{T^2} = MLT^{-2}$$

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

(ii) Matriz Dimensional

$$\begin{array}{c} \mathbf{M} \\ \mathbf{L} \\ \mathbf{T} \end{array} \begin{array}{ccccc} \mathbf{F}_D & \rho & \mathbf{A} & \mathbf{V} & \mu \\ \left(\begin{array}{ccccc} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -3 & 2 & 1 & -1 \\ -2 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{array} \right) \end{array}$$

(iii) Rank (r): ordem do maior determinante não nulo (variáveis independentes)

OBS.2: Analisando o determinante da seguinte matriz, temos:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -3 & 2 \\ -2 & 0 & 0 \end{vmatrix} \neq 0 \longrightarrow r(\text{rank}) = 3$$

(iv) Número de grupos adimensionais relevantes (π grupos)

$$n_{\pi} = n_v - r \longrightarrow n_{\pi} = 5 - 3 \longrightarrow n_{\pi} = 2 \text{ (2 grupos adimensionais)}$$

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

(v) Escolhe-se um núcleo para a determinação dos π grupos

Núcleo: $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{A} - \text{variável geométrica} \\ \mathbf{v} - \text{variável cinemática} \\ \mathbf{\rho} - \text{variável dinâmica} \end{array} \right.$

Deve-se combinar cada uma das variáveis do núcleo com as variáveis restantes para encontrar os adimensionais.

(vi) Determinação dos número adimensionais

(a) $\Pi_1 = A^a V^b \rho^c F_D$

Adimensionalizando:

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^0 L^2 T^0]^a [M^0 L^1 T^{-1}]^b [M^1 L^{-3} T^0]^c [M^1 L^1 T^{-2}]$$

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^{0a+0b+1c+1} L^{2a+1b-3c+1} T^{0a-1b+0c-2}]$$

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

Equacionando M, L e T resulta no seguinte sistema

$$\left. \begin{array}{l} \text{M: } 0a+0b+1c+1=0 \\ \text{L: } 2a+1b-3c+1=0 \\ \text{T: } 0a-1b-0c-2=0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{resolvendo}} \begin{array}{l} a = -1 \\ b = -2 \\ c = -1 \end{array}$$

Coeficiente de arraste (C_D):
 relacionado com a força de
 arraste sobre um corpo.

Logo, retornando ao Π_1 : $\Pi_1 = A^a V^b \rho^c F_D \xrightarrow{\text{Incluindo } \frac{1}{2} \text{ no denominador}} \Pi_1 = \frac{F_D}{\rho V^2 A} \rightarrow C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$

(b) $\Pi_2 = A^a V^b \rho^c \mu$

Adimensionalizando:

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^0 L^2 T^0]^a [M^0 L^1 T^{-1}]^b [M^1 L^{-3} T^0]^c [M^1 L^{-1} T^{-1}]$$

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^{0a+0b+1c+1} L^{2a+1b-3c-1} T^{0a-1b+0c-1}]$$

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

Novamente, equacionando M, L e T resulta no seguinte sistema

$$\left. \begin{array}{l} \text{M: } 0a+0b+1c+1=0 \\ \text{L: } 2a+1b-3c-1=0 \\ \text{T: } 0a-1b+0c-1=0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{resolvendo}} \begin{array}{l} a = -1/2 \\ b = -1 \\ c = -1 \end{array}$$

Logo, retornando ao Π_2 : $\Pi_2 = A^a V^b \rho^c \mu \rightarrow \Pi_2 = \frac{\mu}{A^{1/2} V \rho}$

Visto que a raiz quadrada da área dará uma dimensão de comprimento, podemos substituir " $A^{1/2}$ " por " D ", comprimento característico que no caso da esfera, será o seu diâmetro).

$$\Pi_2 = \frac{\mu}{DV\rho} \xrightarrow{\text{Invertendo este número}} \boxed{Re = \frac{DV\rho}{\mu}} \quad \boxed{\text{Número de Reynolds}}$$

Desta forma, pode escrever:

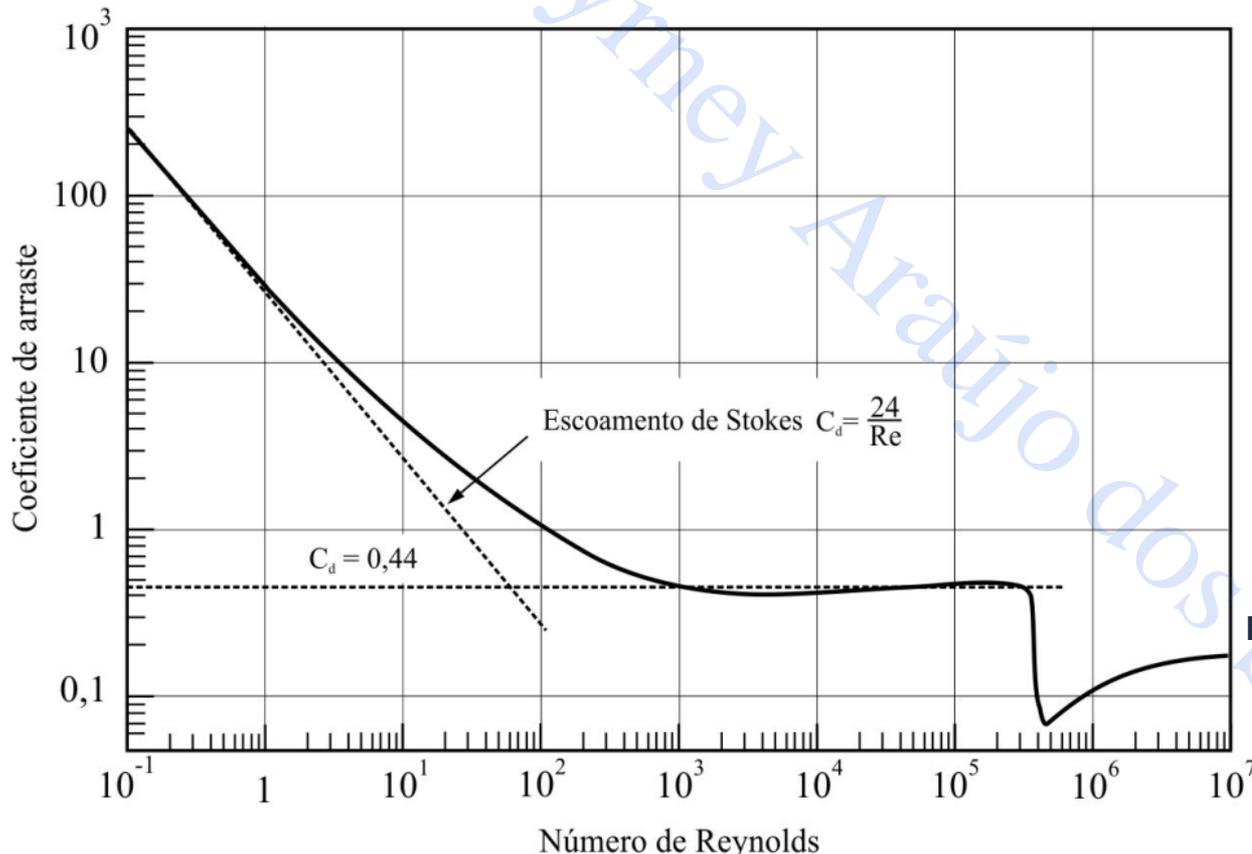
$$\boxed{C_D = f(Re)}$$

OBS.3: Logo, pode-se realizar experimentos utilizando apenas duas variáveis ao invés de cinco para determinar uma correlação para a estimativa de F_D .

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

Valores de coeficiente de arraste (C_D) em função do número de Reynolds (Re) para o escoamento em torno de uma esfera



No caso de baixos números de Re ($Re \leq 1$) (regime de stokes), o coeficiente de arraste (C_D) é dado por:

$$C_D = \frac{24}{Re}$$

No caso de $10^3 \leq Re \leq 5 \times 10^5$ o coeficiente de arraste permanece aproximadamente constante:

$$C_D = 0,44$$

Em torno de $Re = 5 \times 10^5$ ocorre uma queda brusca no valor de C_D devido à transição para o regime turbulento.

6 . Análise Dimensional e Similaridade

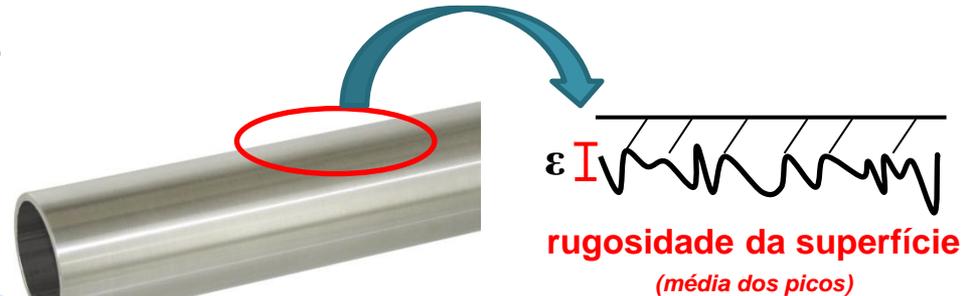
6.2 Teorema π -Buckingham

Exemplo 2 - Análise da Perda de carga de fluidos em escoamento em dutos de seção circular

i) Variáveis relevantes (n_v) e sistema básico de dimensões (MLT θ)

fluido {
 μ : viscosidade do fluido [ML⁻¹T⁻¹]
 ρ : massa específica do fluido [ML⁻³]
 $-\Delta P$: queda de pressão piezométrica [ML⁻¹T²]
 V : velocidade média [LT⁻¹]

tubo {
 D : diâmetro [L]
 L : comprimento [L]
 ε : rugosidade [L]



(ii) Matriz Dimensional

	μ	ρ	D	L	ε	$-\Delta P$	V
M	1	1	0	0	0	1	0
L	-1	-3	1	1	1	-1	1
T	-1	0	0	0	0	-2	-1

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

(iii) Rank (r): ordem do maior determinante não nulo (variáveis independentes)

OBS.3: Analisando o determinante da seguinte matriz, temos:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & -3 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \neq 0 \longrightarrow r(\text{rank}) = 3$$

(iv) Número de grupos adimensionais relevantes (π grupos)

$$n_{\pi} = n_v - r \longrightarrow n_{\pi} = 7 - 3 \longrightarrow n_{\pi} = 4 \text{ (4 grupos adimensionais)}$$

(v) Escolhe-se um núcleo para a determinação dos π grupos

Núcleo: $\left\{ \begin{array}{l} D - \text{variável geométrica} \\ v - \text{variável cinemática} \\ \rho - \text{variável dinâmica} \end{array} \right.$

Deve-se combinar cada uma das variáveis do núcleo com as variáveis restantes para encontrar os adimensionais.

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

(vi) Determinação dos número adimensionais

(a) $\Pi_1 = D^a V^b \rho^c \mu$

Adimensionalizando:

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^0 L^1 T^0]^a [M^0 L^1 T^{-1}]^b [M^1 L^{-3} T^0]^c [M^1 L^{-1} T^{-1}]$$

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^{0a+0b+1c+1} L^{1a+1b-3c-1} T^{0a-1b+0c-1}]$$

Equacionando M, L e T resulta no seguinte sistema

$$\left. \begin{array}{l} \text{M: } 0a+0b+1c+1=0 \\ \text{L: } 1a+1b-3c-1=0 \\ \text{T: } 0a-1b+0c-1=0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{resolvendo}} \begin{array}{l} a = -1 \\ b = -1 \\ c = -1 \end{array}$$

Logo, retornando ao Π_1 : $\Pi_1 = D^a V^b \rho^c \mu \longrightarrow \boxed{\Pi_1 = \frac{\mu}{DV\rho}} \longrightarrow \boxed{\Pi_1 = Re}$ Número de Reynolds

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

(b) $\Pi_2 = D^a V^b \rho^c L$

Adimensionalizando:

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^0 L^1 T^0]^a [M^0 L^1 T^{-1}]^b [M^1 L^{-3} T^0]^c [M^0 L^1 T^0]$$

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^{0a+0b+1c+0} L^{1a+1b-3c+1} T^{0a-1b+0c+0}]$$

Equacionando M, L e T resulta no seguinte sistema

$$\left. \begin{array}{l} \text{M: } 0a+0b+1c+0=0 \\ \text{L: } 1a+1b-3c+1=0 \\ \text{T: } 0a-1b+0c+0=0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{resolvendo}} \begin{array}{l} a = -1 \\ b = 0 \\ c = 0 \end{array}$$

Logo, retornando ao Π_2 : $\Pi_2 = D^a V^b \rho^c L \longrightarrow$

$$\boxed{\Pi_2 = \frac{L}{D}}$$

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

$$(c) \Pi_3 = D^a V^b \rho^c \varepsilon$$

Adimensionalizando:

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^0 L^1 T^0]^a [M^0 L^1 T^{-1}]^b [M^1 L^{-3} T^0]^c [M^0 L^1 T^0]$$

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^{0a+0b+1c+0} L^{1a+1b-3c+1} T^{0a-1b+0c+0}]$$

Equacionando M, L e T resulta no seguinte sistema

$$\left. \begin{array}{l} \text{M: } 0a+0b+1c+0=0 \\ \text{L: } 1a+1b-3c+1=0 \\ \text{T: } 0a-1b+0c+0=0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{resolvendo}} \begin{array}{l} a = -1 \\ b = 0 \\ c = 0 \end{array}$$

Logo, retornando ao Π_3 : $\Pi_3 = D^a V^b \rho^c \varepsilon \longrightarrow$

$$\Pi_3 = \frac{\varepsilon}{D}$$

Rugosidade
relativa

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

$$(d) \Pi_4 = D^a V^b \rho^c (-\Delta P)$$

Adimensionalizando:

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^0 L^1 T^0]^a [M^0 L^1 T^{-1}]^b [M^1 L^{-3} T^0]^c [M^1 L^{-1} T^{-2}]$$

$$[M^0 L^0 T^0] = [M^{0a+0b+1c+1} L^{1a+1b-3c-1} T^{0a-1b+0c-2}]$$

Equacionando M, L e T resulta no seguinte sistema

$$\left. \begin{array}{l} \text{M: } 0a+0b+1c+1=0 \\ \text{L: } 1a+1b-3c-1=0 \\ \text{T: } 0a-1b+0c-2=0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{resolvendo}} \begin{array}{l} a = 0 \\ b = -2 \\ c = -1 \end{array}$$

Logo, retornando ao Π_4 : $\Pi_4 = D^a V^b \rho^c (-\Delta P) \longrightarrow \boxed{\Pi_4 = \frac{(-\Delta P)}{\rho V^2}}$

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

Fazendo

$$\frac{2\Pi_4}{\Pi_2} = \frac{2(-\Delta P) D}{\rho V^2 L} \xrightarrow{\text{define-se}} f = \frac{(-\Delta P) D}{(\rho V^2 / 2) L} \quad (\text{Eq. 1})$$

Fator de atrito de Darcy: relacionado à perda de carga em tubulações.

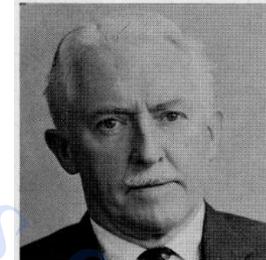
OBS.4: Logo, pode-se realizar experimentos impondo f em função de Re e ϵ/D e obter uma correlação empírica para a previsão do **fator de atrito de Darcy**

$$\longrightarrow f = f\left(Re, \frac{\epsilon}{D}\right)$$

- **Cyril F. Colebrook** propôs a conhecida “**Equação de Colebrook**” para a determinação do fator de atrito (f) em função de Re e ϵ/D em uma tubulação para **escoamento turbulento**:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

(escoamento turbulento)



Cyril F. Colebrook
(1910-1997)

- Da definição do fator de atrito (Eq. 1) e da equação de distribuição de velocidade em escoamento laminar (**deduzida em aulas anteriores**), tem-se (**PROVAR!!!!**):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{escoamento laminar})$$

6 . Análise Dimensional e Similaridade

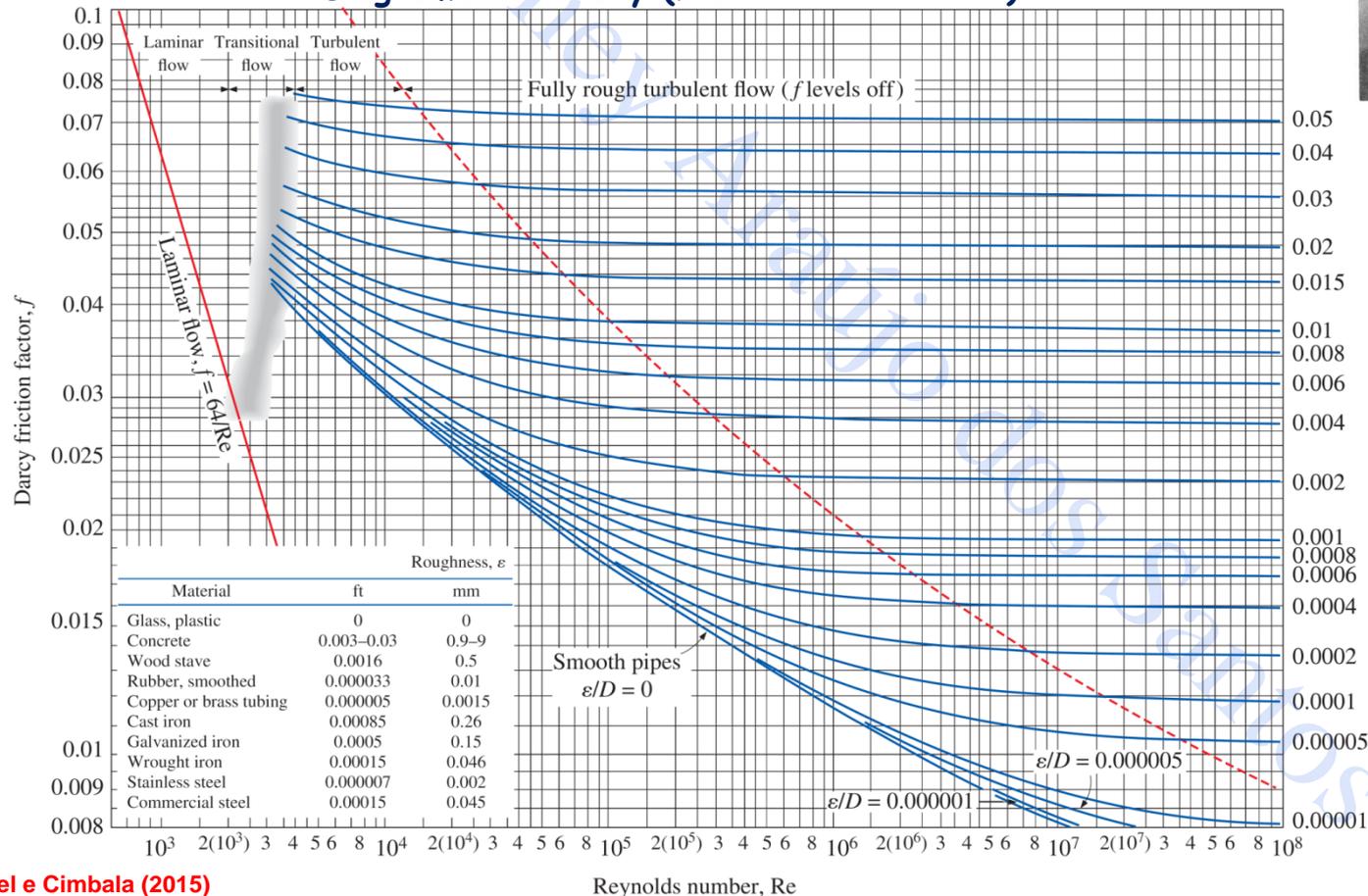
6.2 Teorema π -Buckingham

- Lewis F. Moody** propôs a construção de um diagrama com base na Equação de Colebrook e na equação do fator de atrito para escoamento laminar, o famoso **“Diagrama de Moody”** que é o mais aceito e usado na engenharia (**somente para fluidos newtonianos!!!!**).



Lewis F. Moody
(1880-1953)

Diagrama de Moody (Fluidos Newtonianos)



Relative roughness, ϵ/D

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.2 Teorema π -Buckingham

OBS. 5: Além de poder ser determinado de **forma empírica** ou através do “**Diagrama de Moody**”, o fator de atrito também pode ser obtido de **forma teórica** quando associamos o **fator de atrito** com a **tensão de cisalhamento na parede do tubo** para escoamento laminar.

- Considere a distribuição de velocidade em uma tubulação (“isto foi deduzido anteriormente!!”):

$$V_z = \frac{\Delta P}{4\mu L}(r^2 - R^2)$$

- A tensão viscosa na parede é dada pela lei de Navier-Stokes e, após a derivação da velocidade, tem-se:

$$\tau_w = -\mu \left. \frac{dV_z}{dr} \right|_{r=R} \longrightarrow \tau_w = \frac{-\Delta P \mu R}{2L}$$

- Vimos que o fator de atrito de Darcy (f) pode ser representado pela (Eq. 1) abaixo e, após a substituição da tensão viscosa, tem-se:

$$f = \frac{(-\Delta P) D}{(\rho V^2 / 2) L} \longrightarrow f = \frac{8\tau_w}{\rho V^2}$$

OBS. 6: A desvantagem da **determinação teórica** de f é que é necessário a determinação da **distribuição de velocidades** através de equações diferenciais para, após isto, avaliar o **tensor viscoso na parede do tubo**. Em muitos casos práticos (escoamento turbulento, etc.) a determinação teórica se torna **muito complexa!**

OBS. 6: O fator de atrito de Darcy (f) não deve ser confundido com o **fator de atrito de Fanning** ou **Coefficiente de atrito (C_f)** que é definido como:

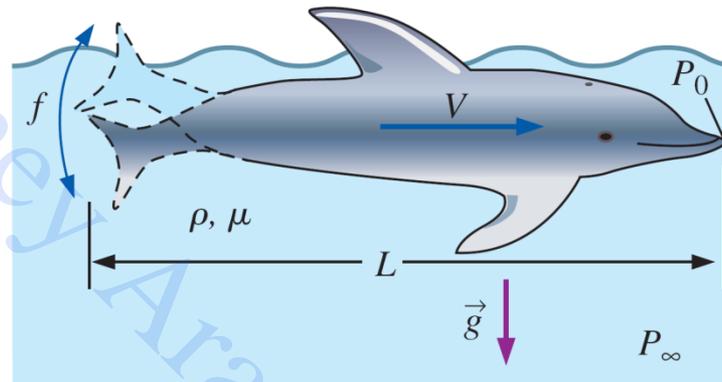
$$C_f = \frac{2\tau_w}{\rho V^2} = \frac{f}{4} \quad (\text{fator de atrito de Fanning})$$

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.3 Grupos Adimensionais Importantes na Mecânica dos Fluidos

As forças encontradas nos fluidos em escoamento incluem:

- (a) forças de inércia;
- (b) forças viscosas;
- (c) forças de pressão;
- (d) forças gravitacionais;
- (e) forças de compressibilidade



Variáveis características em um problema geral de escoamento de fluido com superfície livre

Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

Desta forma pode-se comparar a intensidade relativa das várias forças em relação às **forças de inércia** a qual é proporcional a $\rho V^2 L^2$

1º) **Força viscosa** $\tau A = \mu \frac{du}{dy} A \propto \mu \frac{V}{L} L^2 = \mu V L$ **assim** $\frac{\text{força viscosa}}{\text{força inercial}} \rightarrow \frac{\mu V L}{\rho V^2 L^2} = \frac{\mu}{\rho V L}$

Este parâmetro é tradicionalmente invertido para dar origem ao **número de Reynolds**:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Importância: importante na classificação de escoamentos laminares e turbulentos.

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.3 Grupos Adimensionais Importantes na Mecânica dos Fluidos

2º) **Força de pressão** $\Delta p A \propto \Delta p L^2$ **assim** $\frac{\text{força pressão}}{\text{força inercial}} \longrightarrow \frac{\Delta p L^2}{\rho V^2 L^2} = \frac{\Delta p}{\rho V^2}$

Inserindo um fator de **1/2**, tem-se o **número de Euler**:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

Importância: importante em problemas que envolvem baixas pressões causando a formação de vapor (cavitação) em um líquido.

3º) **Força de gravidade** $mg \propto g \rho L^3$ **assim** $\frac{\text{força gravidade}}{\text{força inercial}} \longrightarrow \frac{g \rho L^3}{\rho V^2 L^2} = \frac{gL}{V^2}$

A raiz quadrada deste parâmetro dá origem ao **número de Froude**:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Importância: importante em escoamentos com superfície livre, não tendo importância na ausência de superfície livre.

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.3 Grupos Adimensionais Importantes na Mecânica dos Fluidos

4°) **Força superficial** σL **assim** $\frac{\text{força superficial}}{\text{força inercial}} \rightarrow \frac{\sigma L}{\rho V^2 L^2} = \frac{\sigma}{\rho V^2 L}$ **Obs:** σ [N/m] é a tensão superficial

O inverso deste parâmetro dá origem ao **número de Weber:**

$$We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$$

Importância: importante no estudo das interfaces gás-líquido ou líquido-líquido.

5°) **Força de compressibilidade** $E_v A \propto E_v L^2$ **assim** $\frac{\text{força compressibilidade}}{\text{força inercial}} \rightarrow \frac{E_v L^2}{\rho V^2 L^2} = \frac{E_v}{\rho V^2}$ **Obs:** E_v é o módulo de elasticidade

Define-se $E_v = \rho c^2$ Logo, o inverso da raiz do parâmetro dá origem ao **número de Mach:**

$$Ma = \frac{V}{c}$$

Importância: importante quando as velocidades são próximas ou superiores à do som. Os efeitos de compressibilidade são desprezíveis quando **Ma < 0,3**.

6 . Análise Dimensional e Similaridade

6.4 Análise de Similaridade

Comentário: Muitas vezes o engenheiro precisa efetuar experimentos num equipamento mas não pode fazê-lo em escala industrial. A melhor solução subentende a construção de um modelo que é um equipamento em escala reduzida similar ao industrial.

Obs: Para assegurar a semelhança entre os escoamentos no **modelo** e no **protótipo** deve-se ter:

a) Semelhança Geométrica: o modelo (**m**) deve ter dimensões perfeitamente proporcionais às do protótipo (**p**) (escala industrial), tal proporção é dita fator de escala (λ), definido por

$$\lambda = \frac{L_m}{L_p} = \frac{D_m}{D_p} = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p}$$

b) Semelhança Dinâmica: as forças envolvidas nos experimentos de laboratório (**modelo**) também devem ser proporcionais às que existirão no protótipo. Logo, os adimensionais relevantes ao problema devem ser iguais, isto é

$$Re_m = Re_p \quad We_m = We_p \quad Ma_m = Ma_p$$

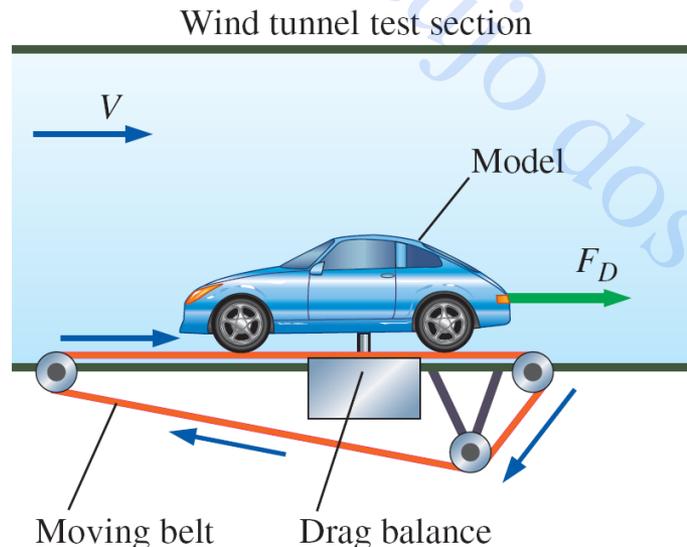
$$Fr_m = Fr_p \quad Eu_m = Eu_p$$

6 . Análise Dimensional e Similaridade

Exercício Proposto: O arrasto aerodinâmico de um novo automóvel esportivo deve ser previsto a uma velocidade de **22,35 m/s** em ar com temperatura de **25°C**. Os engenheiros automotivos criaram um modelo em escala um para cinco do automóvel para testá-lo em um túnel de vento. É inverno e o túnel de vento está localizado em um prédio sem aquecimento. A temperatura do ar no túnel de vento é de apenas **5°C**. Determine a velocidade com a qual os engenheiros devem executar o túnel de vento para atingir a similaridade entre o modelo e o protótipo.

Dados: ar a $T = 25^\circ\text{C}$ implica $\rho = 1,184 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1,849 \times 10^{-5} \text{ kg/(m.s)}$

ar a $T = 5^\circ\text{C}$ implica $\rho = 1,269 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1,754 \times 10^{-5} \text{ kg/(m.s)}$



Bibliografia

BIRD, R.B.; STEWART, W.E. e; LIGHTFOOT, E.N. Fenômenos de transporte, 2ª ed., LTC, 2004.

ÇENGEL, Y.A e CIMBALA, J.M.; Mecânica dos fluidos, McGraw Hill, 3ª edição, 2015.

WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos. 6ª edição. MCGRAW-HILL, 2011.