Escoamentos Externos

PME3222 - Mecânica dos Fluidos Para Eng. Civil

PME/EP/USP

Prof. Antonio Luiz Pacífico

1° Semestre de 2017

Conteúdo da Aula

1. Introdução
2. Escoamentos Externos
3. Exercícios de Aula

Introdução

Os escoamentos são classificados como internos ou externos dependendo do fato do fluido ser forçado a escoar num duto ou sobre uma superfície. Escoamento de água num cano é um exemplo de escoamento interno. Escoamento do ar ao redor de um automóvel é um exemplo de escoamento externo.

Quando o escoamento se dá no interior de um duto mas não ocupa toda sua seção transversal é chamado de escoamento em canal aberto. Outros exemplos deste tipo são escoamentos de rios ou canais construídos para o escoamento de rios e esgotos.

Introdução

A viscosidade e o gradiente de pressão são os efeitos dominantes nos escoamentos internos. Para escoamentos em canais abertos os efeitos dominantes são o da viscosidade e gravidade. Finalmente, nos escoamentos externos a viscosidade só tem infuência numa região do escoamento muito próxima a uma superfície, chamada de camada limite, ou na esteira formada à jusante de corpos imersos nesses escoamentos.

Dutos ou condutos são canais por onde o escoamento é forçado a passar. a forma geométrica da sua seção transversal é qualquer: circular, retangular, elíptica, etc. Entretanto, dutos de seção transversal circular recebem denominação própria, por ser a forma mais utilizada. Estes dutos são chamados de tubos. Cano é o termo coloquial para designar tubo.

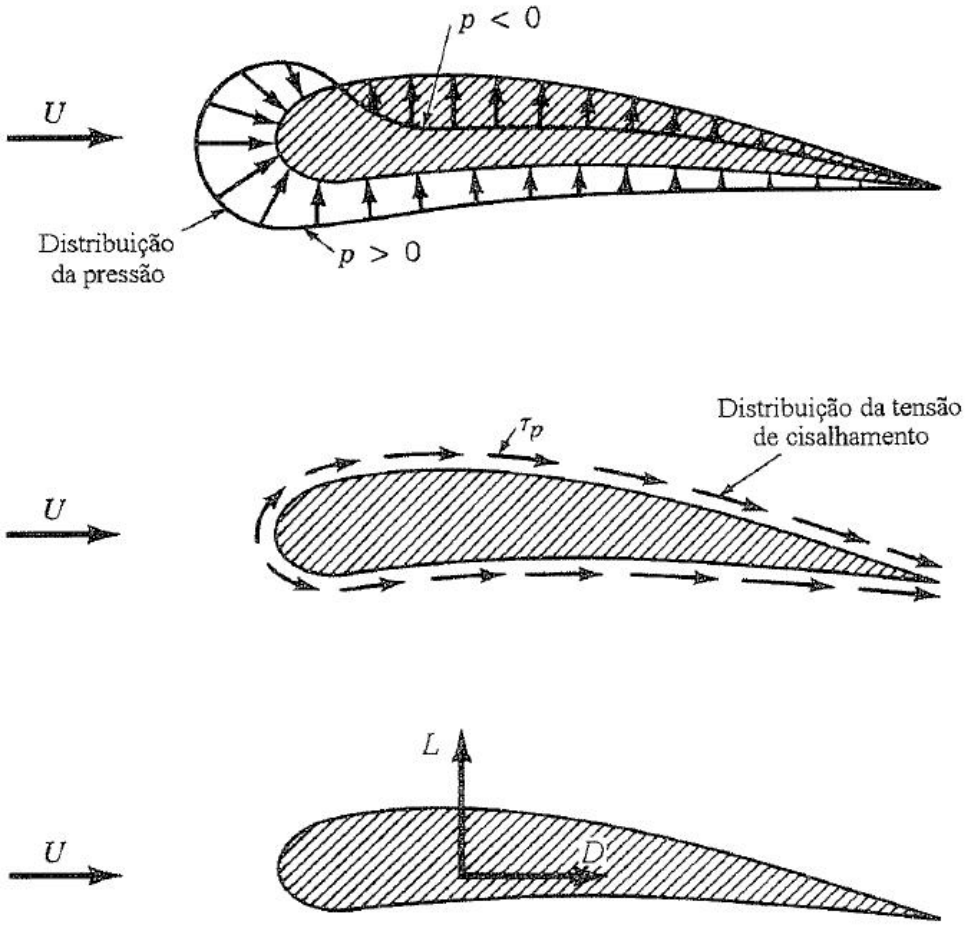
Escoamentos Externos

Neste tópico analisa-se a natureza do escoamento viscoso sobre (ou ao redor) de corpos. Tal como no escoamento interno, aqui também o escoamento pode ser classificado como laminar ou turbulento e o campo de escoamento pode ser dividido em regiões distintas: região na qual os efeitos viscosos são desprezíveis; e região na qual os efeitos da tensão viscosa são relevantes devido a presença da camada limite.

As forças que atuam num corpo imerso num escoamento são o resultado da iteração entre o corpo e o fluido. Estas forças são dadas em função da tensão de cisalhamento na interface sólifo/fluido, τ_p, provocada pela viscosidade, e pela tensão normal, devida basicamente à pressão, p.

A seguir apresenta-se uma figura que mostra a distribuição destas tensões ao redor de um aerofólio (forma aerodinâmica), bem como as forças de sustentação, L, e arrasto, D, que são o resultado destas distribuições de tensões (integração ao longo do contorno da superfície).

Arrasto e Sustentação



$$D = \int dF_x = \int p.\cos\theta.dA + \int \tau_p.\text{sen}\theta.dA$$

$$L = \int dF_y = -\int p.\text{sen}\theta.dA + \int \tau_p.\cos\theta.dA$$

É preciso conhecer como p, τ_p e θ variam ao longo da superfície do corpo.

Arrasto e Sustentação

Definem-se os coeficientes de arrasto, C_D, e sustentação, C_L, como a divisão das respectivas forças por unidade de área pela pressão dinâmica do escoamento não perturbado:

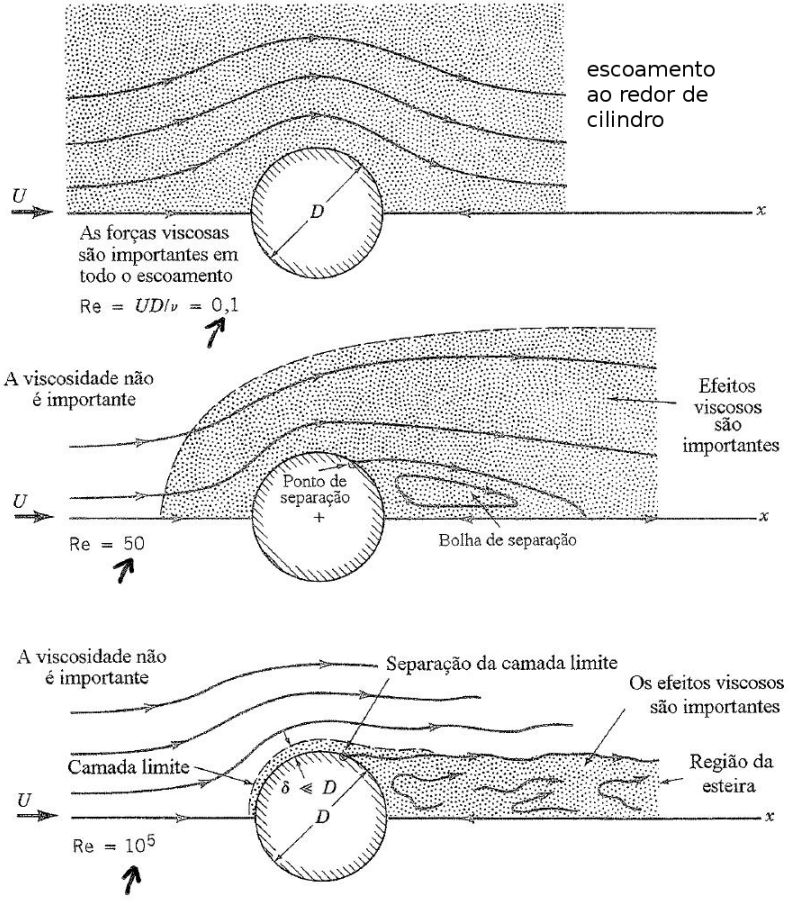
$$C_D = \frac{D}{(1/2).\rho.U^2.A_{ref}} \tag{1}$$

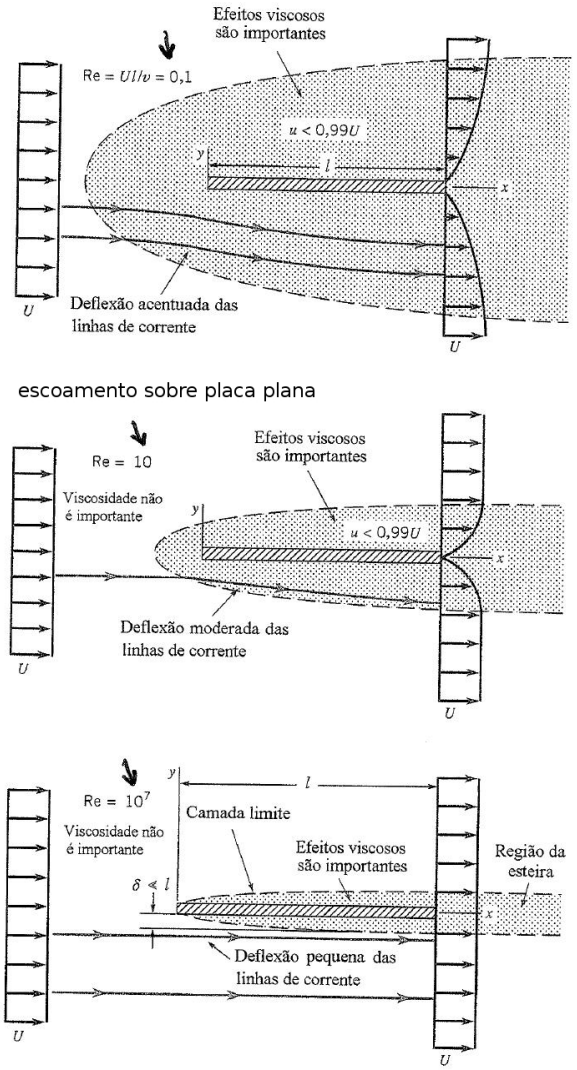
$$C_L = \frac{L}{(1/2).\rho.U^2.A_{ref}} \tag{2}$$

onde A_{ref} é uma área de referência; ρ é a massa específica do fluido; e U é a velocidade na região não perturbado (ao longe; em muitas referências esta velocidade é simbolizada por V_∞).

Os grupos (números) adimensionais mais usuais para caracterização dos escoamentos externos são os números de Reynolds, Re, Mach, M, e Froude, Fr, sendo Re o mais importante de todos.

Camada Limite





Camada Limite

O Re é o que melhor caracteriza os escoamentos externos. Note que o aumento de Re (predominância dos efeitos de inércia sobre os viscosos) causa a diminuição da espessura da região onde os efeitos viscosos são relevantes (observe as deflexões das linhas de corrente - LC).

Como o fluido deve aderir à superfície sólida, segue-se que dentro da região viscosa o perfil de velcocidades deve ajustar-se desde a velocidade da superfície (geralmente nula) até a velocidade da região naõ perturbada, U. A esta região dominada pela viscosidade dá-se o nome de **camada limite, CL**, sendo δ sua espessura, função da posição, x.

Ao redor do cilindro notar o ponto de separação da CL e a região de esteira.

Camada Limite

O conceito de camada limite foi formulado por Ludwig Prandtl (1904). Antes dele a Mecânica do Fluidos desenvolveu-se em 2 direções: a hidrodinâmica teórica que tratava de escoamentos invíscidos (Euler, 1755); e a hidráulica experimental que buscava explicações para as quais as teorias da hidronâmica não bastavam.

Embora as equações completas do movimento dos fluidos já fossem conhecidas (Equações de Navier-Stokes) antes de Prandtl, as dificuldades matemáticas para resolvê-las proibiam o tratamento teórico dos escoamentos viscosos. Prandtl mostrou que muitos escoamentos de fluidos viscosos podem ser tratados em duas regiões distintas: uma próxima das fronteiras sólidas (a CL, onde é importante a influência da viscosidade); e outra compreendendo o restante do escoamento (onde o efeito da viscosidade é desprezível, podendo-se tratar o escoamento como invíscido).

Camada Limite

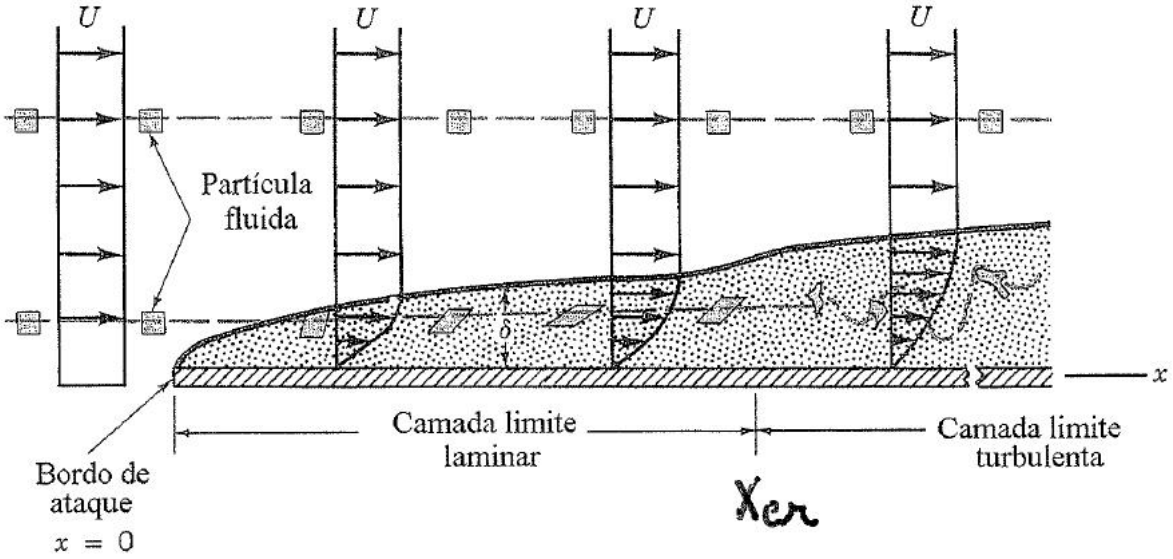
O conceito de CL deu o elemento de ligação que faltava entre teoria e prática e marcou o começo da era moderna na Mecânica dos Fluidos.

Na CL ambas as forças devido à viscosidade e à inércia são importantes. Neste região o Re é significante para caracterizar os escoamentos. O comprimento característico para seu cálculo nesta região pode ser um comprimento da direção e sentido do escoamento ou qualquer medida da espessura da CL.

O escoamento na CL pode ser laminar ou turbulento. Não há Re único para transição. Este fenômeno é dependente do gradiente de pressão no escoamento, da rugosidade da superfície sólida, de haver ou não transferência de calor na superfície, presença de forças de campo (gravidade, eletromagnéticas, etc.), presença de perturbações...

Camada Limite

O caso mais geral e de grande aplicação prática é o escoamento sobre uma placa plana. Nesta condição geométrica, sem gradiente de pressão e transferência de calor, a transição laminar-turbulento ocorre para $3 \times 10^6 < \mathrm{Re}_{cr} < 4 \times 10^6$ (com mínima perturbação). Para efietos de cálculo considera-se $\mathrm{Re}_{cr} = 5 \times 10^5$ (o subscrito *cr* refere-se à crítico - ponto de transição), com $\mathrm{Re} = \rho.U.x/\mu$, onde x é comprimento da placa na direção e sentido do escoamento.



A CL laminar ocupa pequeno trecho a partir do bordo de ataque da placa. A transição também ocupa um pequeno trecho. A CL turbulenta é mais espessa e possui taxa de crescimento maior.

Camada Limite

A espessura de perturbação, δ, da CL, é usualmente definida pela distância entre a superfície (sólida) e o ponto no qual a velocidade é cerca de 99% da velocidade na corrente livre, U. Essa espessura δ, para CL laminar é calculada por:

$$\delta = 5 \cdot \sqrt{\frac{\nu . x}{U}} \text{ ; ou } \frac{\delta}{x} = \frac{5}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}} \tag{3}$$

e a tensão de cisalhamento na parede (superfície da placa), τ_p, para CL laminar é dada por:

$$\tau_p = 0,332 \cdot U^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{\rho . \mu}{x}} \tag{4}$$

O efeito da viscosidade na CL é o de retardar o movimento. Assim, o fluxo mássico adjacente à superfície sólida é menor do que aquele que se verificaria na mesma região se não existisse a CL.

Camada Limite

Para CL turbulenta, δ e τ_p para placas planas são dados por:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,37}{\mathrm{Re}_x^{1/5}} \tag{5}$$

$$\tau_p = 0,0288 \cdot \frac{\rho . U^2}{\mathrm{Re}_x^{1/5}} \tag{6}$$

As Eqs. (5) e (6) são válidas para $5 \times 10^5 \leqslant \mathrm{Re}_x \leqslant 10^7$. Para todas as Eqs. [(3) a (6)], Re_x é o número de Reynolds na posição x específica medida a partir do bordo de ataque da placa, tal que:

$$\mathrm{Re}_x = \frac{\rho . U . x}{\mu} = \frac{U . x}{\nu}$$

Arrasto

O arrasto sobre corpos é divido às distribuições de τ_p e p, como já visto. À parcela do arrasto devida ao atrito viscoso (τ_p) dá-se o nome de arrasto por atrito, D_f. À parcela do arrasto provocada pela pressão chama-se arrasto devido à pressão, ou arrasto de forma, D_p. O arrasto total sobre um corpo e, analogamente, o coefificnete de arrasto total, é a soma de ambas as contribuições:

$$D = D_f + D_p \tag{7}$$

$$C_D = C_{Df} + C_{Dp} \tag{8}$$

Para placas planas com escoamento laminar sobre eles, o coeficiente de arrasto por atrito, C_{Df}, é dado por:

$$C_{Df} = \frac{1.328}{\sqrt{\mathrm{Re}_L}} \tag{9}$$

Arrasto

Para placas planas com escoamento turbulento sobre elas, o coeficiente de arrasto por atrito, C_{Df}, é dado por:

$$C_{Df} = \frac{0,072}{\mathrm{Re}_L^{1/5}} \tag{10}$$

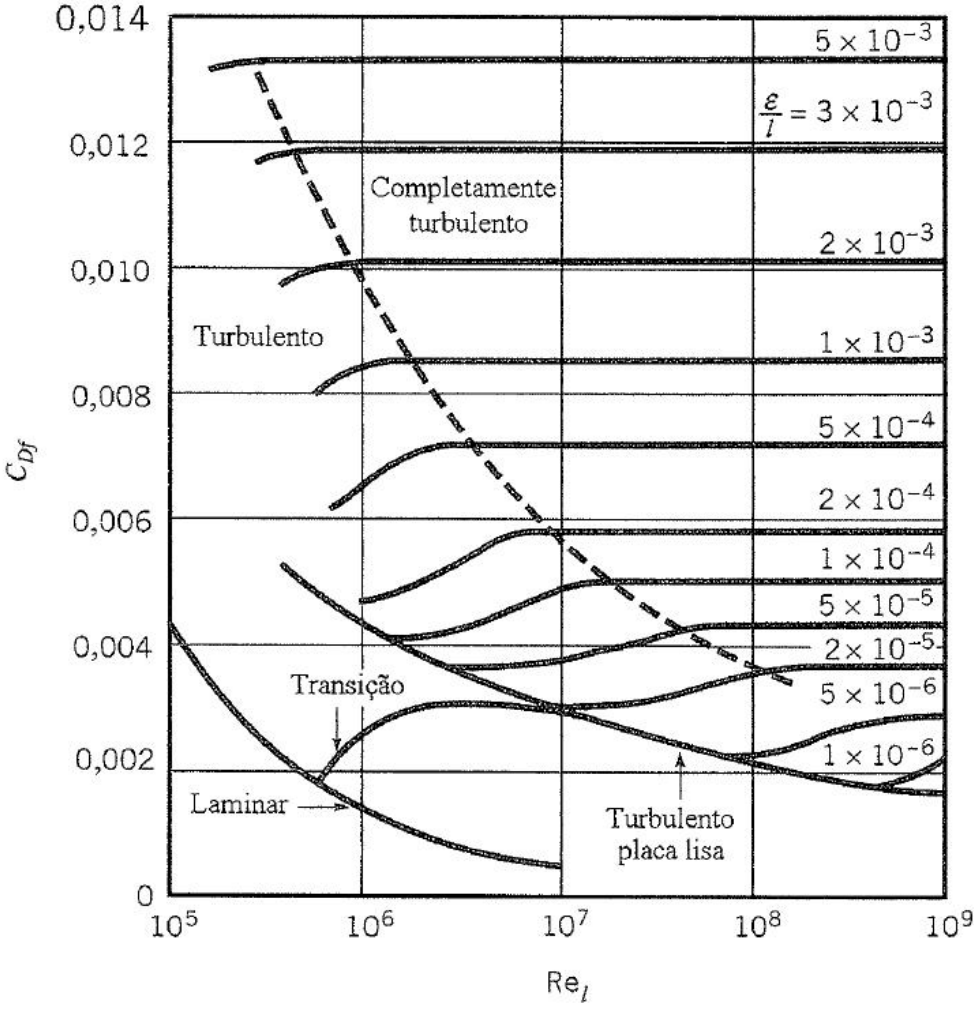
com Re_L válido na faixa: $5 \times 10^5 \leqslant \mathrm{Re}_L \leqslant 10^7$.

Nas Eqs. (9) e (10) Re_L é o número de Reynolds para o comprimento total da placa, L, medido a partir do bordo de ataque da placa, tal que:

$$\mathrm{Re}_L = \frac{\rho.U.L}{\mu} = \frac{U.L}{\nu}$$

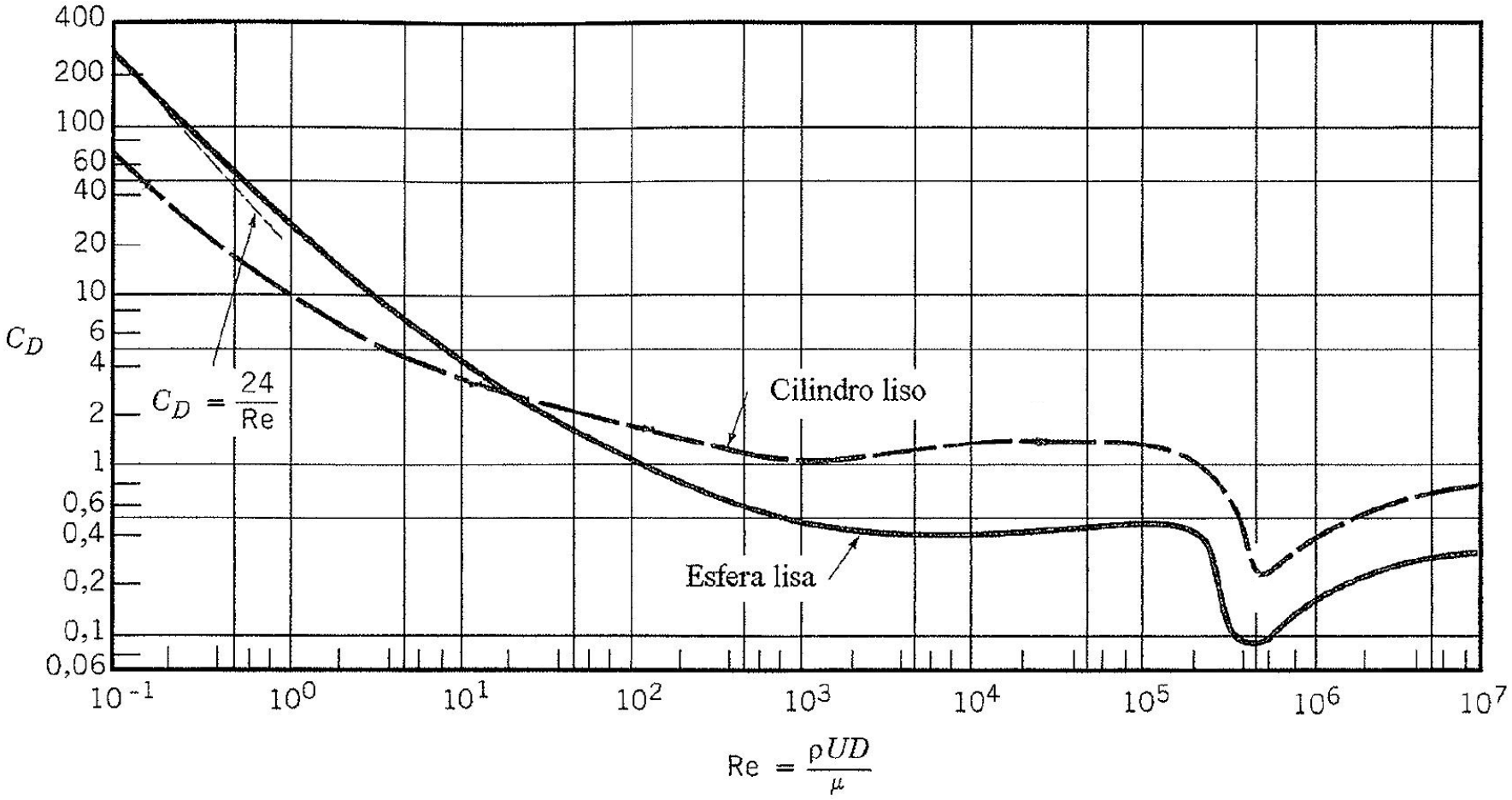
Na sequência são apresentados diversos gráficos e tabelas com valores de coeficientes de arrasto para diversas geometrias.

Arrasto por Atrito em placas planas

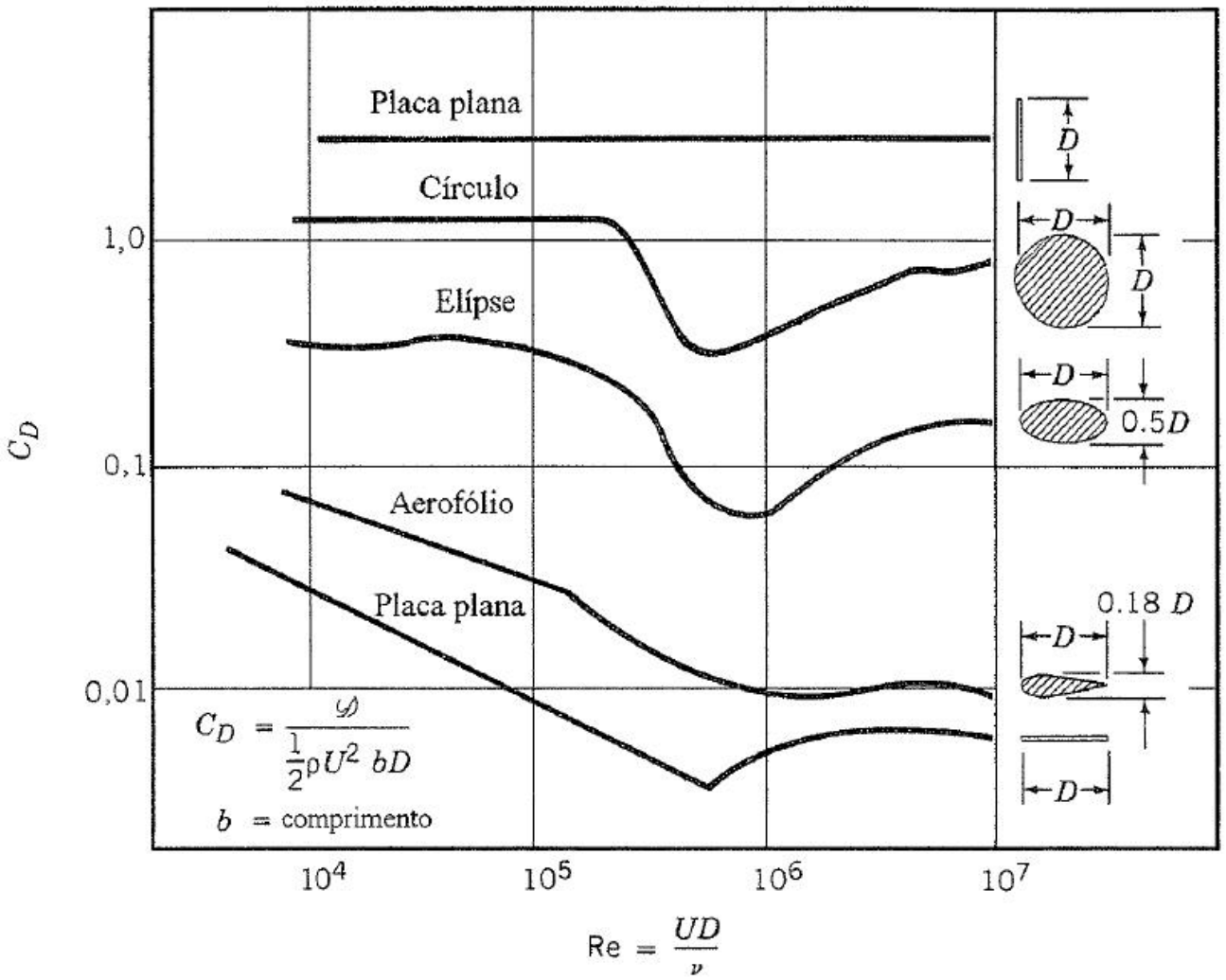


A figura ao lado resume os valores de C_{Df} sobre placas planas lisas ou rugosas, tanto para escoamentos laminares como turbulentos. Esta figura é semelhante ao diagrama de Moody para escoamentos em dutos.

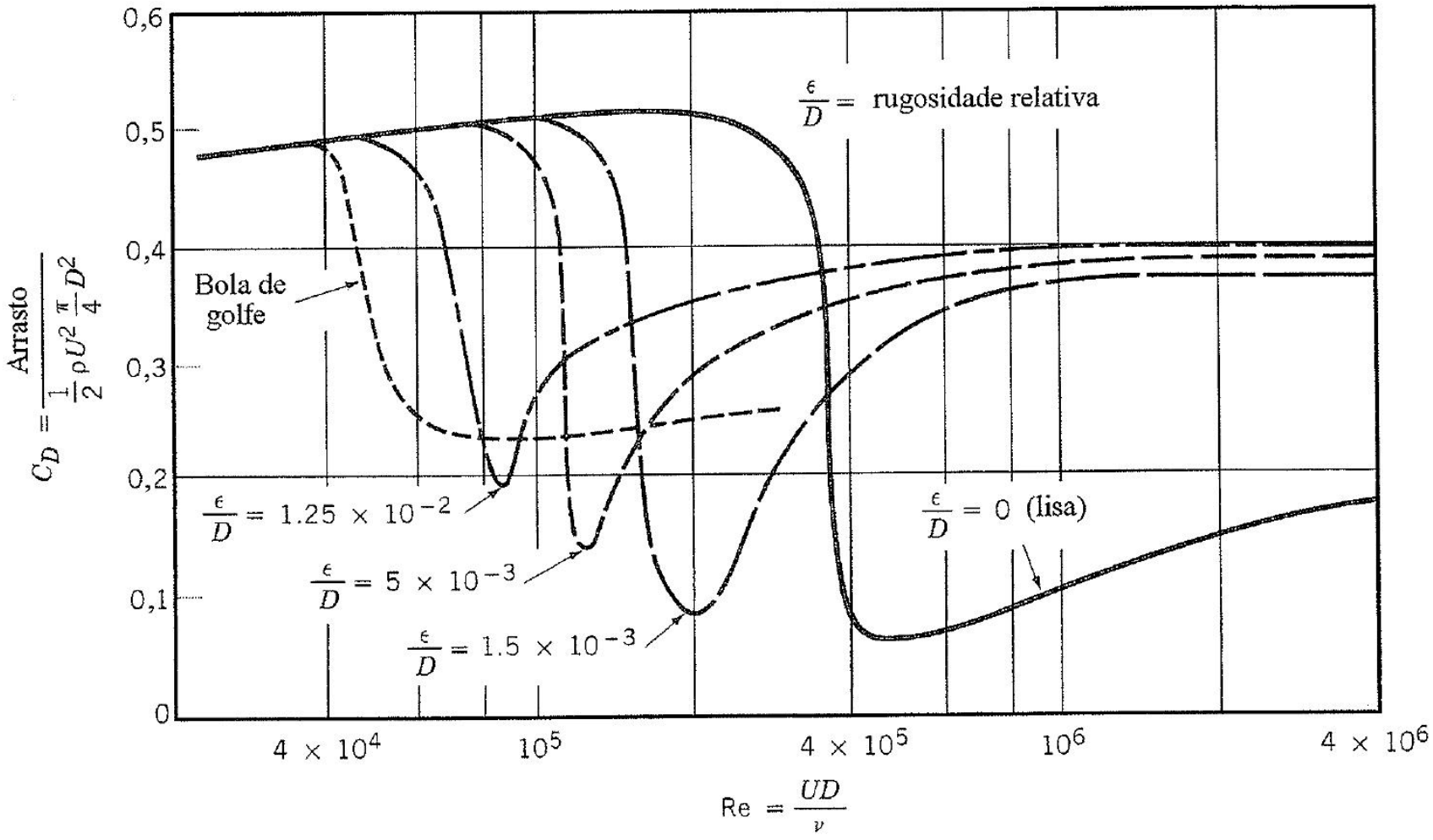
Arrasto total: esferas e cilindros lisos



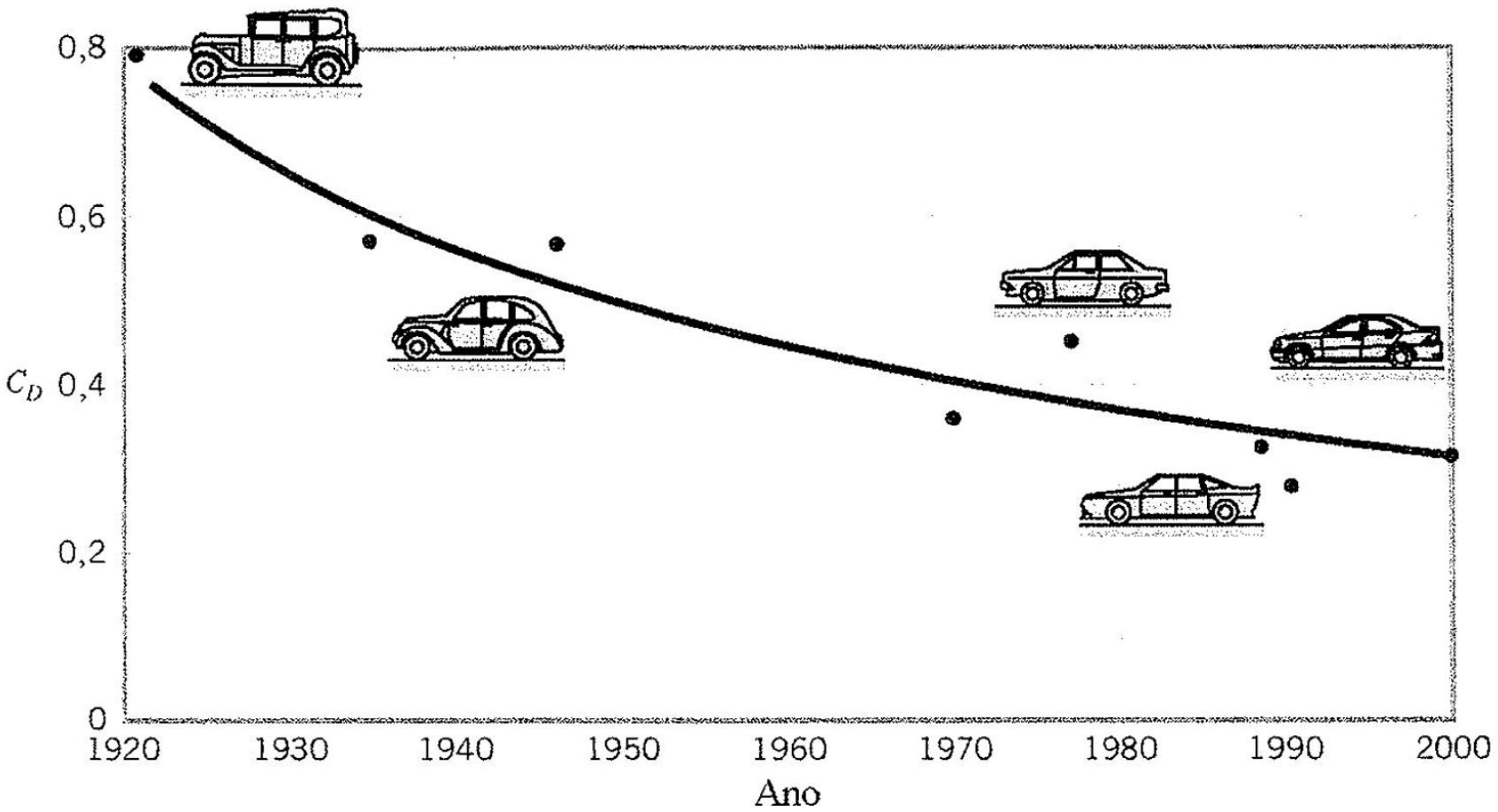
Arrasto total: alguns corpos bidimensionais



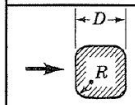
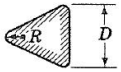
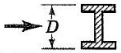
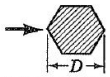
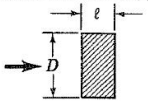
Arrasto total: esferas rugosas



Arrasto total: evolução para automóveis



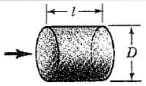
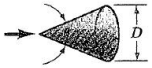
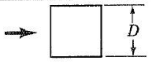
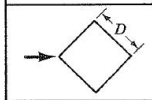
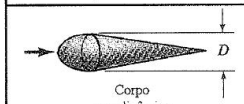
Arrasto total: objetos bidimensionais

Forma	Área de Referência A (b = comprimento)	Coeficiente de arrasto $C_D = \dfrac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$	Número de Reynolds $Re = UD\rho/\mu$
 Barra quadrada com cantos arredondados	$A = bD$	R/D — C_D 0 — 2,2 0,02 — 2,0 0,17 — 1,2 0,33 — 1,0	$Re = 10^5$
 Triângulo eqüilátero com cantos arredondados	$A = bD$	R/D — C_D → ← 0 — 1,4 — 2,1 0,02 — 1,2 — 2,0 0,08 — 1,3 — 1,9 0,25 — 1,1 — 1,3	$Re = 10^5$
Casca semicircular	$A = bD$	→ 2,3 ← 1,1	$Re = 2 \times 10^4$
Cilindro semicircular	$A = bD$	→ 2,15 ← 1,15	$Re > 10^4$
Barra T	$A = bD$	→ 1,80 ← 1,65	$Re > 10^4$
 Barra I	$A = bD$	2,05	$Re > 10^4$
Barra L	$A = bD$	→ 1,98 ← 1,82	$Re > 10^4$
 Hexágono	$A = bD$	1,0	$Re > 10^4$
 Retângulo	$A = bD$	l/D — C_D ≤ 0,1 — 1,9 0,5 — 2,5 0,65 — 2,9 1,0 — 2,2 2,0 — 1,6 3,0 — 1,3	$Re = 2 \times 10^5$

Arrasto total: objetos tridimensionais

Forma	Área de referência	Coeficiente de arrasto, C_D
Pára - quedas	Área Frontal $A = \pi D^2/4$	1,4
Antena parabólica porosa	Área Frontal $A = \pi D^2/4$	Porosidade 0 0,2 0,5 → 1,42 1,20 0,82 ← 0,95 0,90 0,80 Porosidade = área aberta/área total
Pessoa média	de pé sentado agachado	$C_D A = 0{,}84$ m² $C_D A = 0{,}56$ m² $C_D A = 0{,}23$ m²
Bandeira panejando	$A = LD$	l/D C_D 1 0,07 2 0,12 3 0,15
Empire State Building	Área frontal	1,4
Trem com seis carros de passageiros	Área frontal	1,8
Bicicleta		
Comum	$A = 0{,}51$ m²	1,10
Corrida	$A = 0{,}51$ m²	0,88
"Drafting"	$A = 0{,}51$ m²	0,50
Aerodinâmica	$A = 0{,}51$ m²	0,12
Caminhão com carreta fechada		
Comum	Área frontal	0,96
Defletor Com defletor	Área frontal	0,76
Selo Com defletor e selo	Área frontal	0,70
Árvore $U = 10$ m/s $U = 20$ m/s $U = 30$ m/s	Área frontal	0,43 0,26 0,20
Golfinho	Área molhada	0,0036 em Re $= 6 \times 10^6$ (uma placa plana apresenta $C_{Df} = 0{,}0031$)
Pássaro grande	Área frontal	0,40

Arrasto total: objetos tridimensionais

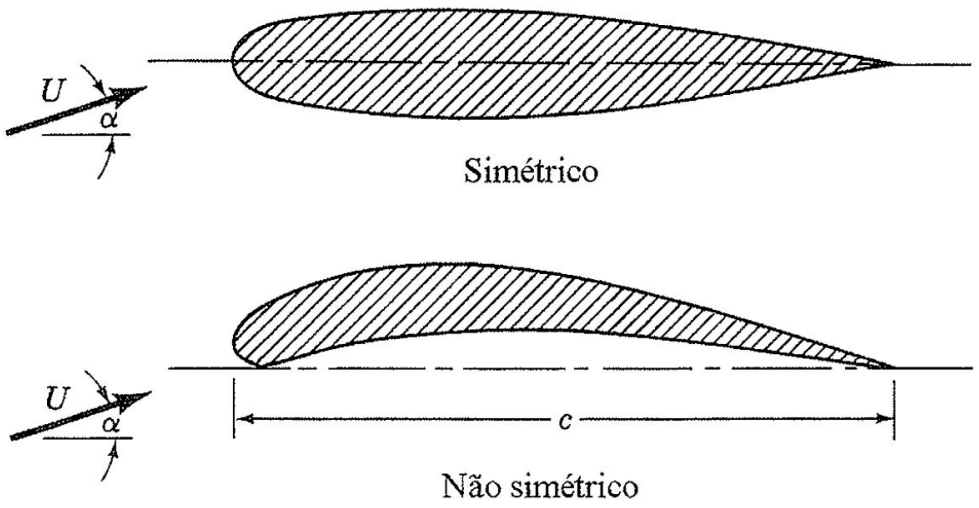
Forma	Área de Referência A	Coeficiente de arrasto C_D	Número de Reynolds Re
Hemisfério sólido	$A = \pi D^2/4$	→ 1,17 ← 0,42	$Re > 10^4$
Hemisfério oco	$A = \pi D^2/4$	→ 1,42 ← 0,38	$Re > 10^4$
Disco fino	$A = \pi D^2/4$	1,1	$Re > 10^3$
 Eixo paralelo ao escoamento	$A = \pi D^2/4$	l/D C_D 0,5 1,10 1,0 0,93 2,0 0,83 4,0 0,85	$Re > 10^5$
 Cone	$A = \pi D^2/4$	θ, graus C_D 10 0,30 30 0,55 60 0,80 90 1,15	$Re > 10^4$
 Cubo	$A = D^2$	1,05	$Re > 10^4$
 Cubo	$A = D^2$	0,80	$Re > 10^4$
 Corpo aerodinâmico	$A = \pi D^2/4$	0,04	$Re > 10^5$

Sustentação

São diversas as aplicações das forças sustentadoreas aerodinâmicas, tais como em aeronáutica, veicular, naval, etc. Dentre os corpos cuja forma geométrica em interação com o escoamento que provocam forças sustentadoras o que é mais largamente utilizado é a asa.

Uma asa é caracterizada pela sua superfície S, que é a sua área projetada num plano. O comprimento da asa na direção do escoamento sobre ela e perpendicular ao seu bordo de ataque até seu bordo de fuga é chamado de corda, c. O comprimento da asa de ponta a ponta chama-se envergadura, l.

Sustentação



O ângulo de ataque, α, é o ângulo formado pela direção da corda e a direção da velocidade do escoamento na região não perturbada, U. A figura ao lado mostra estas definições tanto para um perfil simétrico como para um não simétrico, também conhecido como cambado.

Sustentação

Outro parâmetro importante para asas é a chamada razão de aspecto, $\mathcal{A}$, definida por:

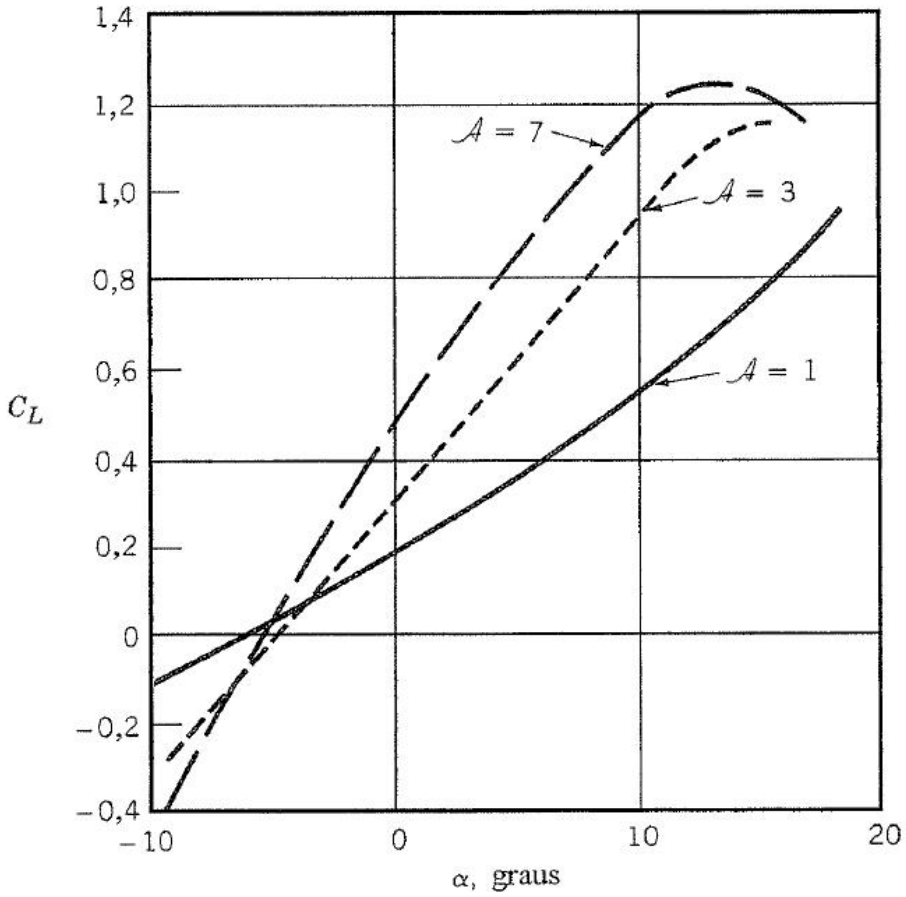
$$\mathcal{A} = \frac{l^2}{S}$$

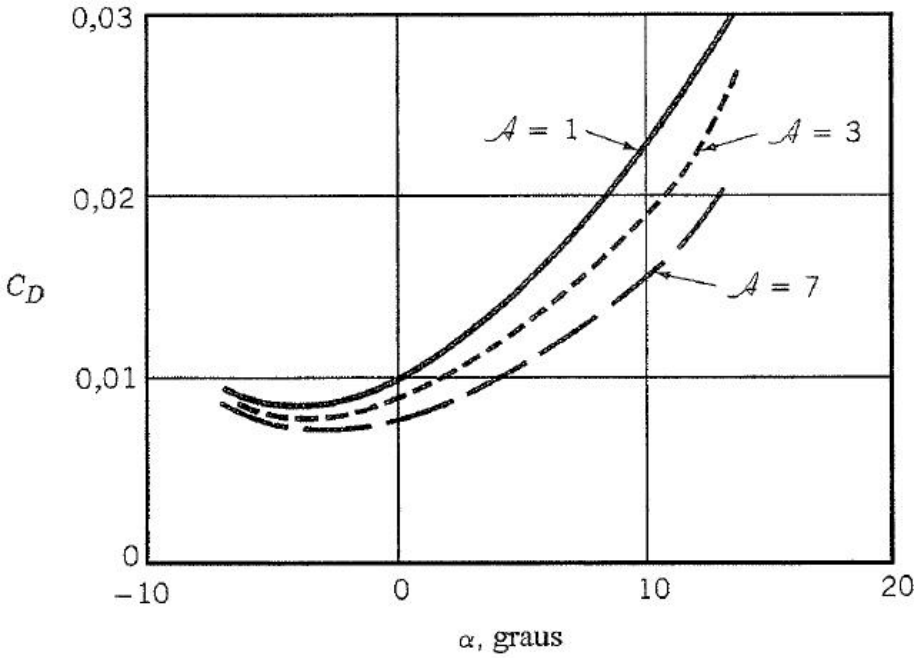
Se o comprimento da corda, c, for constante ao longo da envergadura (asa chamada retangular), então:

$$\mathcal{A} = \frac{l}{c}$$

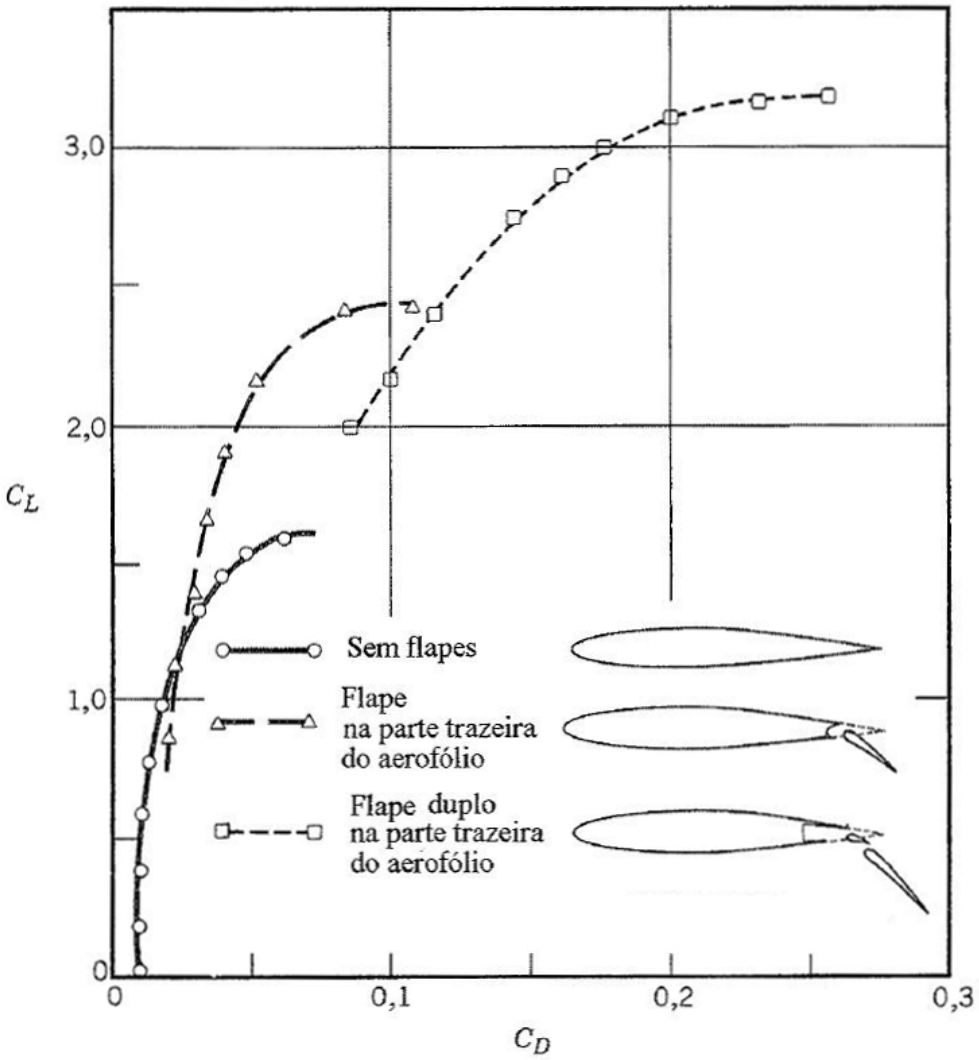
As figuras a seguir apresentam curvas típicas para os coeficientes de sustentação, C_L, e arrasto, C_D, para a asas. Normalmente o C_L aumenta e o C_D diminui com o aumento de $\mathcal{A}$. O arrasto causado pelo comprimento finito das asas é chamado de arrasto induzido.

Sustentação: valores típicos de C_L e C_D para aerofólios

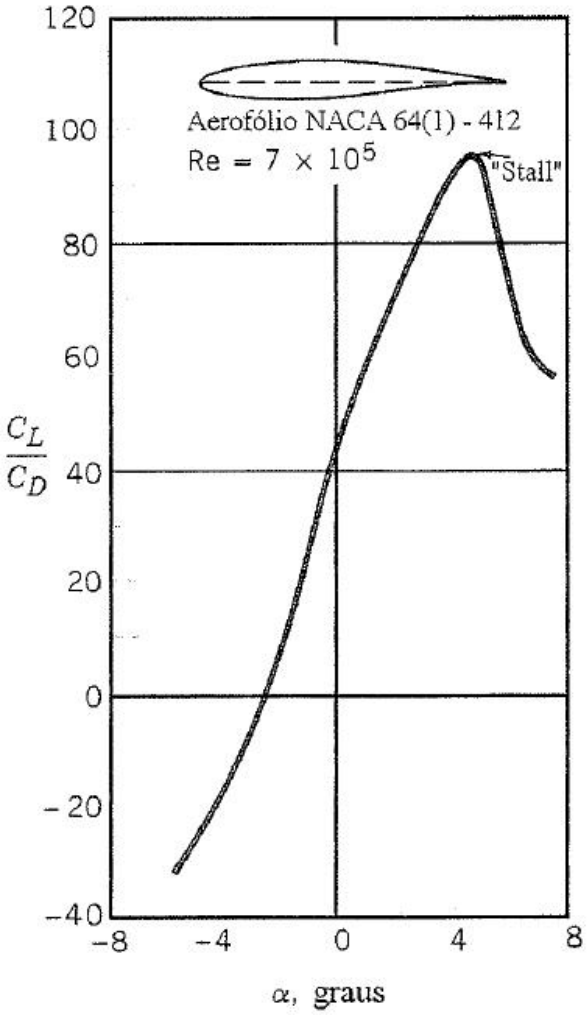


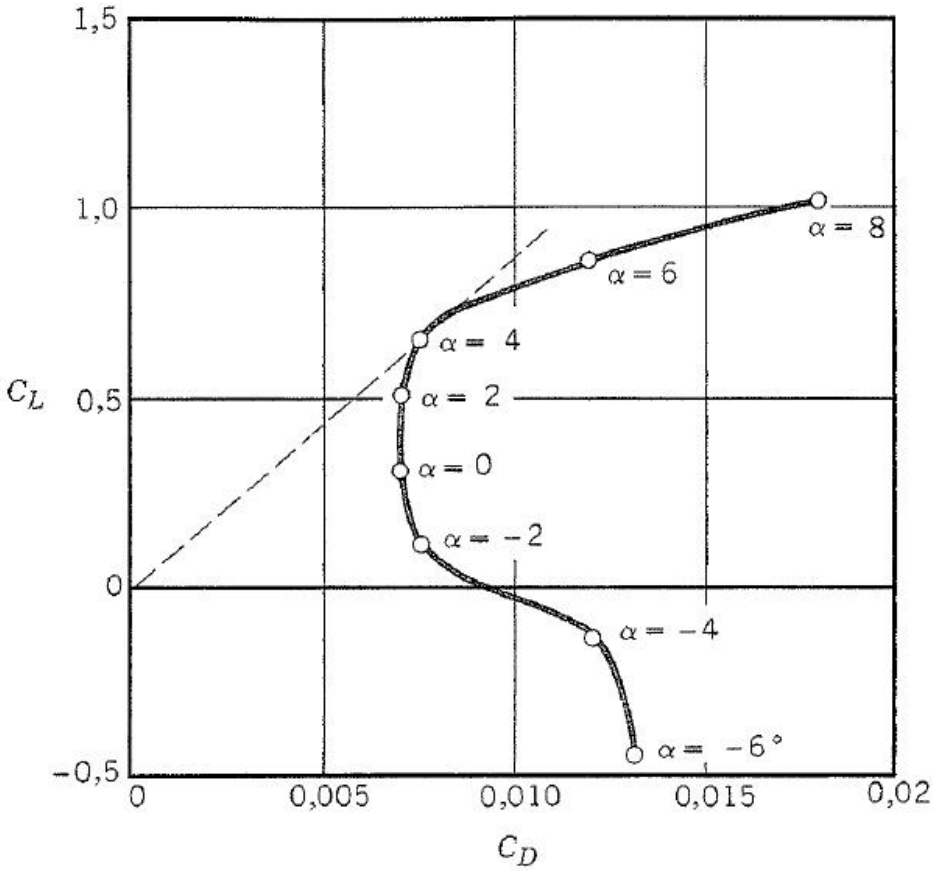


Sustentação: típica curva *polar de arrasto*



Sustentação: polar de arrasto - NACA 64(1)-412

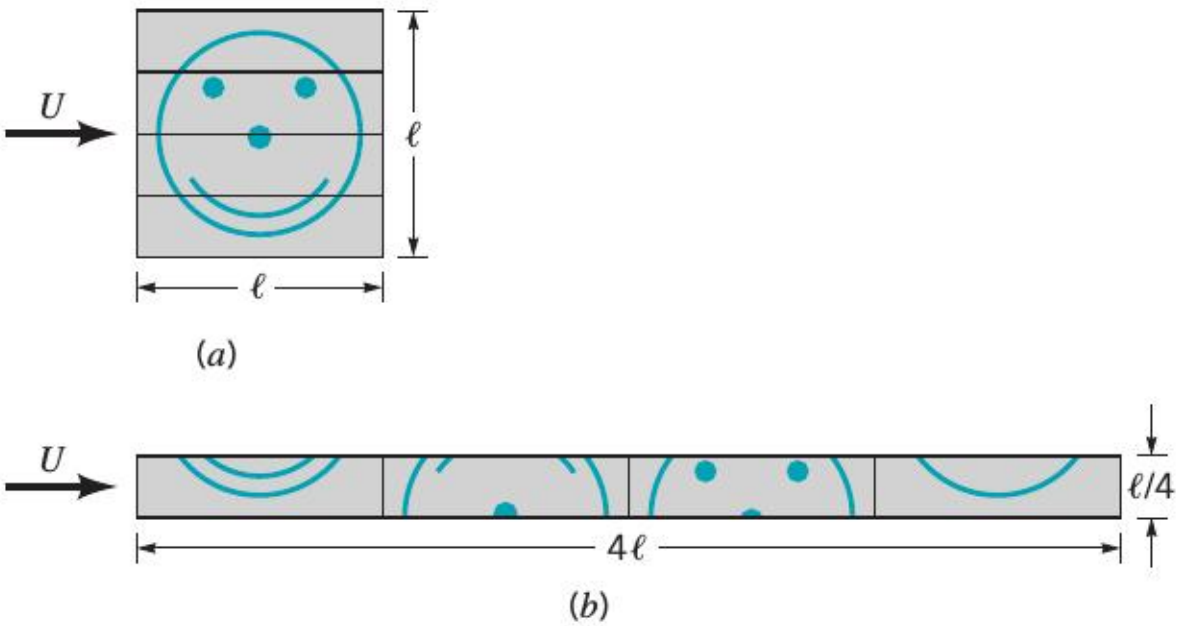




Fenômeno de *Downwash*

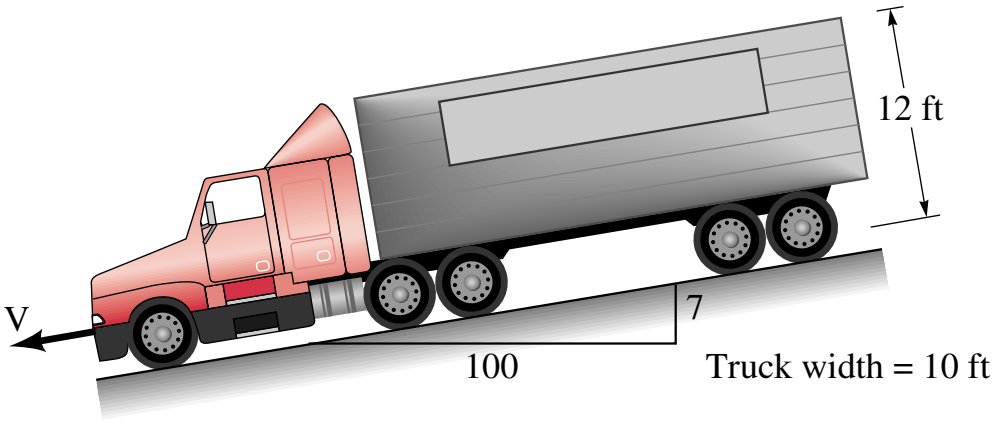
Exercício de Aula 1

Enunciado: A placa quadrada mostrada na figura (a) abaixo foi cortada em quatro placas iguais e arranjada do modo indicado na figura (b). Determine a razão entre o arrasto na placa original (caso a) e aquele que ocorre no novo arranjo (caso b). Admita que as camadas limite são laminares. Justifique, fisicamente, sua resposta. [Munson, 9.28, 4a Edição]



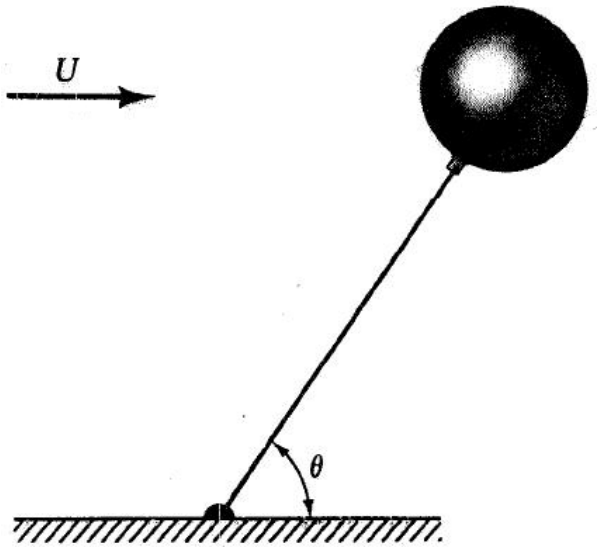
Exercício de Aula 2

Enunciado: Um caminhão com massa total igual a 22,7 toneladas, perdeu o freio e desce a ladeira de concreto indicada na figura abaixo. A velocidade terminal do caminhão, V, é determinada pelo equilíbrio das forças peso, resistência ao rolamento e arrasto aerodinâmico. Admita que a resistência ao rolamento é igual a 1,2% do peso do caminhão e que o coeficiente de arrasto é 0,96 quando o defletor de ar na cabine não está presente e 0,70 quando está presente. Determine a velocidade terminal do caminhão nestas duas situações. [Munson, 9.55, 4a Edição]



Exercício de Aula 3

Enunciado: Uma bóia esférica de plástico (peso específico = 2041 N/m^3) está ancorada no fundo de um rio do modo indicado na figura ao lado. Sabendo que o coeficiente de arrasto da boia é igual a 0,5 e o ângulo θ vale 60°, estime a velocidade do rio. [Munson, 9.61, 4a Edição]



Exercício de Aula 4

Enunciado: Um avião Boeing 747 pesa $2,58 \times 10^6$ N quando carregado com combustível e 100 passageiros. Nesta condição, a velocidade para decolagem é 225 km/h. Com a mesma configuração (i.e. ângulo de ataque, pocidionamento de flapes, etc.), qual é a velocidade de decolagem do avião carregado com 327 passageiros? Admita que cada passageiro com bagagem pesa 890 N. [Munson, 9.93, 4a Edição]

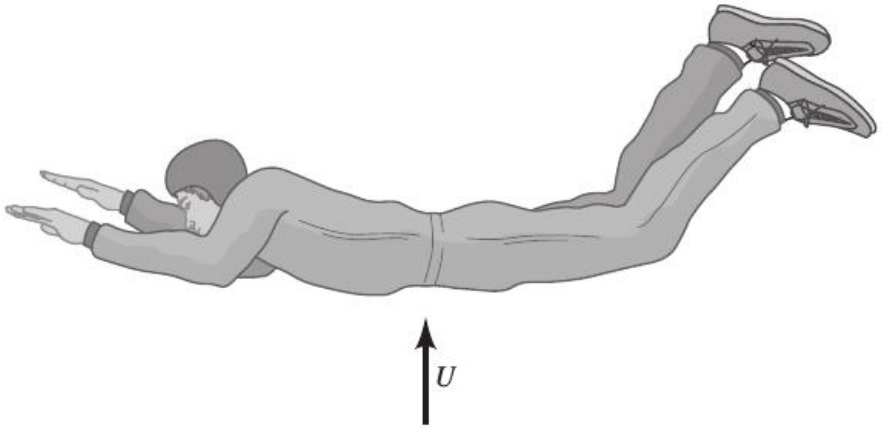
Exercício Proposto 1

Enunciado: Um ventilador de teto com cinco pás gira a 100 rpm. Se cada pá apresenta comprimento e largura iguais a 0,8 e 0,1 m, estime o torque necessário para vencer o atrito nas pás. Admita que as pás se comportam como placas planas. [Munson, 9.36, 4a Edição]
Resp.: 0,0438 N.m.

Exercício Proposto 2

Enunciado: A figura abaixo que nós podemos utilizar um túnel de vento vertical para praticar pára-quedismo. Estime a velocidade vertical necessária para sustentar uma pessoa (a) curvada e (b) deitada. Admita que a massa da pessoa é igual a 75 kg e que os coeficientes de arrasto são aqueles indicados na Figura 9.30 (livro texto). [Munson, 9.59, 4a Edição]

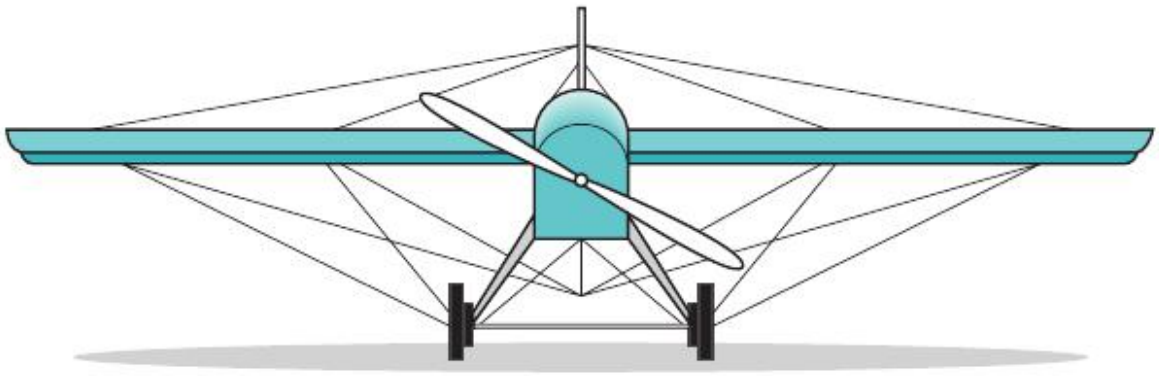
Resp.: (a) 70,6 m/s; (b) 37,2 m/s.



Exercício Proposto 3

Enunciado: As asas dos aviões antigos eram sempre reforçadas com cabos. Se o coeficiente de arrasto para as asas era 0,2 (baseado na área projetada), determine a proporção entre o arrasto causado pelos cabos de reforço e aquele causado pelas assas. [Munson, 9.88, 4a Edição]

Resp.: 0,225.



Speed: 70 mph
Wing area: 148 ft^2
Wire: length = 160 ft
diameter = 0.05 in.