Polytechnic University of Puerto Rico – Orlando Campus

ME 3140 – Intermediate Fluid Mechanics

Assignment 14

External Flow (Examples 1, 2, and 4)

Instructor: Dr. Joaquín Valencia Bravo

Student: Antonio Pérez
ID: 158655

Date: 6 de febrero de 2026

Example 1. Drag coefficient of a car (Wind tunnel)

Drag and Lift

Example 1

The drag coefficient of a car at the design conditions of 1 atm, 70°F, and 60 mi/h is to be determined experimentally in a large wind tunnel in a full-scale test (Fig. E-1). The frontal area of the car is 22.26 ft^2. If the force acting on the car in the flow direction is measured to be 68 lbf, determine the drag coefficient of this car.

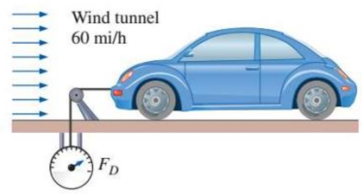

Figure E-1

Figura 1: Ensayo en túnel de viento a 60.00 mi/h.

Enunciado

Se desea determinar el coeficiente de arrastre C_D de un carro en un túnel de viento grande. Condiciones: $P = 1{,}00\,\mathrm{atm}$, $T = 70{,}00\,°\mathrm{F}$, $V = 60{,}00\,\mathrm{mi/h}$, área frontal $A = 22{,}26\,\mathrm{ft}^2$. La fuerza de arrastre medida es $F_D = 68{,}00\,\mathrm{lbf}$. Hallar C_D.

Datos (Given)

Variable	Valor	Nota
P	$1{,}00\,\mathrm{atm}$	condición de prueba
T	$70{,}00\,°\mathrm{F}$	condición de prueba
V	$60{,}00\,\mathrm{mi/h}$	velocidad del flujo
A	$22{,}26\,\mathrm{ft}^2$	área frontal
F_D	$68{,}00\,\mathrm{lbf}$	fuerza de arrastre medida
ρ	$0{,}07\,\mathrm{lbm/ft}^3$	de tabla a $70{,}00\,°\mathrm{F}$ (aire)
g_c	$32{,}17\,\mathrm{lbm\cdot ft/(lbf\cdot s^2)}$	constante gravitacional

Supuestos

- Flujo estacionario (steady flow).
- Incompresible (a esta velocidad, aproximación usada en el ejemplo).
- Se asume túnel suficientemente grande (sin bloqueo significativo).

Fórmulas

ID	Fórmula	Uso
F1	$C_D = \dfrac{F_D}{\frac{1}{2}\,\rho\,V^2\,A}$	definición con densidad (consistente en unidades)
F2	$V\ [\mathrm{ft/s}] = V\ [\mathrm{mph}]\left(\dfrac{5280\ \mathrm{ft}}{1\ \mathrm{mi}}\right)\left(\dfrac{1\ \mathrm{h}}{3600\ \mathrm{s}}\right)$	conversión de velocidad
F3	$\rho_{\mathrm{slug}} = \dfrac{\rho_{\mathrm{lbm}}}{g_c}$	convertir ρ a slugs/ft^3

Desarrollo

Paso 1. Convertir la velocidad a ft/s (F2)

$$V = 60{,}00\,\mathrm{mi/h}\left(\frac{5280\ \mathrm{ft}}{1\ \mathrm{mi}}\right)\left(\frac{1\ \mathrm{h}}{3600\ \mathrm{s}}\right) = 88{,}00\,\mathrm{ft/s}$$

$$V = 88{,}00\,\mathrm{ft/s}$$

Paso 2. Convertir densidad a slugs/ft^3 (F3)

$$\rho_{\text{slug}} = \frac{\rho_{\text{lbm}}}{g_c} = \frac{0{,}07489}{32{,}17} = 0{,}00\,\text{slug/ft}^3$$

$$\rho = 0{,}00\,\text{slug/ft}^3$$

Paso 3. Calcular C_D (F1)

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\,\rho_{\text{slug}}\,V^2\,A} = \frac{68}{\frac{1}{2}(0{,}00233)(88^2)(22{,}26)} = 0{,}34$$

$$C_D \approx 0{,}34$$

Resultado

$$\boxed{C_D \approx 0{,}34}$$

Example 2. Fuel efficiency improvement (reduce frontal area)

Example 2

Two common methods of improving fuel efficiency of a vehicle are to reduce the drag coefficient and the frontal area of the vehicle. Consider a car (Fig. E-2) whose width (W) and height (H) are 1.85 m and 1.70 m, respectively, with a drag coefficient of 0.30. Determine the amount of fuel and money saved per year as a result of reducing the car height to 1.55 m while keeping its width the same. Assume the car is driven 18,000 km a year at an average speed of 95 km/h. Take the density and price of gasoline to be 0.74 kg/L and \$0.95/L, respectively. Also take the density of air to be 1.20 kg/m^3, the heating value of gasoline to be 44,000 kJ/kg, and the overall efficiency of the car's drive train to be 30 percent.

Figure E-2

Figura 2: Figura E-2. Vehículo considerado para el análisis de arrastre.

Enunciado

Se desea estimar el combustible y dinero ahorrado por año al reducir el área frontal del vehículo. Carro con ancho $W = 1{,}85\,\mathrm{m}$, altura inicial $H_1 = 1{,}70\,\mathrm{m}$ y $C_D = 0{,}30$. Se reduce la altura a $H_2 = 1{,}55\,\mathrm{m}$ manteniendo el ancho. Se conduce $D = 18\,000{,}00\,\mathrm{km/yr}$ a $\bar{V} = 95{,}00\,\mathrm{km/h}$. Datos: $\rho_{air} = 1{,}20\,\mathrm{kg/m^3}$, gasolina $\rho_f = 0{,}74\,\mathrm{kg/L}$, costo $\$0{,}95/L$, $HV = 44\,000{,}00\,\mathrm{kJ/kg}$, eficiencia global $\eta = 0{,}30$.

Datos (Given)

Variable	Valor	Descripción
W	$1{,}85\,\mathrm{m}$	ancho del carro
H_1	$1{,}70\,\mathrm{m}$	altura inicial
H_2	$1{,}55\,\mathrm{m}$	altura rediseñada
C_D	$0{,}30$	coeficiente de arrastre
$\bar{V}$	$95{,}00\,\mathrm{km/h}$	velocidad promedio
D	$18\,000{,}00\,\mathrm{km/yr}$	distancia anual
ρ_{air}	$1{,}20\,\mathrm{kg/m^3}$	densidad del aire
ρ_f	$0{,}74\,\mathrm{kg/L}$	densidad gasolina
C_f	$\$0{,}95/L$	precio gasolina
HV	$44\,000{,}00\,\mathrm{kJ/kg}$	heating value
η	$0{,}30$	eficiencia global drivetrain

Supuestos

- Flujo estacionario.
- Se usa el modelo de arrastre cuadrático: $F_D = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_D$.
- El trabajo útil para vencer arrastre en el año es $W_{drag} = F_D\, D$.
- La energía química de entrada cumple $\eta = W_{drag}/E_{in} \Rightarrow E_{in} = W_{drag}/\eta$.

Fórmulas

ID	Fórmula	Uso
F1	$A = W\,H$	área frontal aproximada
F2	$V\,[m/s] = V\,[km/h]\left(\frac{1000}{3600}\right)$	conversión velocidad
F3	$F_D = \frac{1}{2}\rho_{air}V^2 AC_D$	fuerza de arrastre
F4	$W_{drag} = F_D\,D$	trabajo anual contra arrastre
F5	$\eta = \frac{W_{drag}}{E_{in}} \Rightarrow E_{in} = \frac{W_{drag}}{\eta}$	energía química requerida
F6	$m_f = \frac{E_{in}}{HV}$	masa de combustible
F7	$V_f\,[L] = \frac{m_f}{\rho_f}$	volumen de combustible
F8	$\text{Costo} = V_f\,C_f$	costo anual

Desarrollo

Paso 1. Velocidad promedio en m/s (F2)

$$V = 95{,}00\,\text{km/h}\left(\frac{1000}{3600}\right) = 26{,}39\,\text{m/s}$$

$$V = 26{,}39\,\text{m/s}$$

Paso 2. Área frontal antes y después (F1)

$$A_1 = W\,H_1 = (1{,}85)(1{,}70) = 3{,}14\,\text{m}^2 \qquad A_2 = W\,H_2 = (1{,}85)(1{,}55) = 2{,}87\,\text{m}^2$$

$$A_1 = 3{,}14\,\text{m}^2 \qquad A_2 = 2{,}87\,\text{m}^2$$

Paso 3. Arrastre antes y después (F3)

$$F_{D,1} = \tfrac{1}{2}(1{,}20)(26{,}39^2)(3{,}145)(0{,}30) = 394{,}25\,\text{N}$$

$$F_{D,2} = \tfrac{1}{2}(1{,}20)(26{,}39^2)(2{,}8675)(0{,}30) = 359{,}46\,\text{N}$$

$$F_{D,1} = 394{,}25\,\text{N} \qquad F_{D,2} = 359{,}46\,\text{N}$$

Paso 4. Trabajo anual contra arrastre (F4)

$$D = 18\,000{,}00\,\text{km/yr} = 1{,}80\times10^7\,\text{m/yr}$$

$$W_{drag,1} = F_{D,1}D = (394{,}25)(1{,}80\times10^7) = 7{,}10\times10^9\,\text{J/yr}$$

$$W_{drag,2} = F_{D,2}D = (359{,}46)(1{,}80\times10^7) = 6{,}47\times10^9\,\text{J/yr}$$

$$W_{drag,1} = 7{,}10\times10^9\,\text{J/yr} \qquad W_{drag,2} = 6{,}47\times10^9\,\text{J/yr}$$

Paso 5. Energía de entrada y masa de combustible (F5–F6)

$$E_{in,1} = \frac{W_{drag,1}}{\eta} = \frac{7{,}10\times10^9}{0{,}30} = 2{,}37\times10^{10}\,\text{J/yr} \qquad E_{in,2} = \frac{6{,}47\times10^9}{0{,}30} = 2{,}16\times10^{10}\,\text{J/yr}$$

$$HV = 44\,000{,}00\,\text{kJ/kg} = 4{,}40\times10^7\,\text{J/kg}$$

$$m_{f,1} = \frac{E_{in,1}}{HV} = \frac{2{,}37\times10^{10}}{4{,}40\times10^7} = 537{,}62\,\text{kg/yr} \quad m_{f,2} = \frac{2{,}16\times10^{10}}{4{,}40\times10^7} = 490{,}19\,\text{kg/yr}$$

$$m_{f,1} = 537{,}62\,\text{kg/yr} \qquad m_{f,2} = 490{,}19\,\text{kg/yr}$$

Paso 6. Volumen y costo anual (F7–F8)

$$V_{f,1} = \frac{m_{f,1}}{\rho_f} = \frac{537{,}62}{0{,}74} = 726{,}51\,\mathrm{L/yr} \quad V_{f,2} = \frac{490{,}19}{0{,}74} = 662{,}42\,\mathrm{L/yr}$$

$$\Delta V_f = V_{f,1} - V_{f,2} = 64{,}09\,\mathrm{L/yr}$$

$$\Delta\mathrm{Costo} = \Delta V_f(\$0{,}95/L) = (64{,}09)(0{,}95) = 60{,}88\ \$/yr$$

$$\Delta V_f = 64{,}09\,\mathrm{L/yr} \qquad \Delta\mathrm{Costo} = \$\,60{,}88\,\mathrm{yr}$$

Resumen (resultados)

Cantidad	Antes ($H_1 = 1{,}70\,\mathrm{m}$)	Después ($H_2 = 1{,}55\,\mathrm{m}$)	Ahorro
Área frontal A (m^2)	3.14	2.87	–
Arrastre F_D (N)	394.25	359.46	34.79
Volumen gasolina (L/yr)	726.51	662.42	64.09
Costo anual ($/yr)	690.18	629.30	60.88

$$\boxed{\text{Fuel saved} \approx 64{,}09\,\mathrm{L/yr} \qquad \text{Money saved} \approx \$\,60{,}88\,\mathrm{yr}}$$

Example 4. Drag force on a pipe spanning a river

Example 4

A 2.2-cm-outer-diameter pipe is to span across a river at a 30-m-wide section while being completely immersed in water (Fig. E-4). The average flow velocity of water is 4 m/s, and the water temperature is 15°C. Determine the drag force exerted on the pipe by the river.

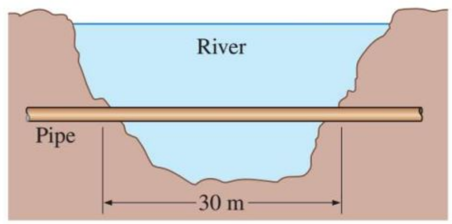

Figure E-4

Figura 3: Figure E-4. Pipe completely immersed in a river flow.

Datos (Given)

Variable	Valor	Descripción
D	0.02 m	Diámetro exterior del tubo
L	30.00 m	Longitud (ancho del río)
V	4.00 m/s	Velocidad promedio del agua
Fluido	Agua	Completamente inmerso
T	15.00 °C	Temperatura del agua
ρ	999.10 kg/m^3	Densidad del agua a 15.00 °C
μ	1.14×10^{-3} kg/(m · s)	Viscosidad dinámica a 15.00 °C

Supuestos

- Flujo estacionario.
- Flujo incompresible.
- Superficie exterior lisa (smooth).

Fórmulas

$$F_D = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_D$$

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

$$A = L\,D$$

Desarrollo

Paso 1. Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(999{,}1)(4)(0{,}022)}{1{,}138 \times 10^{-3}} = 7{,}73 \times 10^4$$

$$\boxed{Re \approx 7{,}7 \times 10^4}$$

Paso 2. Coeficiente de arrastre

De la gráfica de cilindro en flujo cruzado (usando $Re \approx 7{,}7 \times 10^4$):

$$C_D \approx 1$$

$$C_D \approx 1$$

Paso 3. Área proyectada

$$A = L\,D = (30)(0{,}022) = 0{,}66\,\mathrm{m}^2$$

$$A = 0{,}66\,\mathrm{m}^2$$

Paso 4. Fuerza de arrastre

$$F_D = \frac{1}{2}(999{,}1)(4^2)(0{,}66)(1) = 5275{,}20\,\mathrm{N}$$

$$F_D = 5275{,}20\,\mathrm{N}$$

Resultado final

$$\boxed{F_D = 5{,}28 \times 10^3\,\mathrm{N}}$$