



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN AERODINÁMICA DE UN
VEHÍCULO PESADO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

P R E S E N T A:

KOZVY OSORIO MONTES

DIRECTOR DE TESIS

M EN I. ARMANDO MALDONADO SUSANO



CD. UNIVERSITARIA, AGOSTO DEL 2015



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
Ingeniería mecánica – Mecánica aplicada

CARACTERIZACIÓN AERODINÁMICA DE UN VEHÍCULO PESADO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
Kozvy Osorio Montes

TUTOR
Armando, Maldonado, Susano, Facultad de ingeniería

MÉXICO, D. F. AGOSTO 2015



Índice

Introducción

Definición del problema

Hipótesis

Objetivo

Metodología

Capítulo 1

Antecedentes: Aerodinámica en un vehículo pesado

- 1.1 Balance de energía en un vehículo pesado
- 1.2 Tecnologías vehiculares
 - 1.2.1 Deflector de aire
 - 1.2.2 Mejoras tecnológicas en la aerodinámica de un vehículo pesado
 - 1.2.3 Pérdidas de energía
 - 1.2.4 Área frontal de vehículos pesados
 - 1.2.5 Zonas para mejorar
- 1.3 Cargas auxiliares
- 1.4 Resistencia al rodamiento
- 1.5 Peso vehicular
- 1.6 La marcha en ralentí

Capítulo 2

Conceptos básicos de mecánica de fluidos

- 2.1 Capa límite.
- 2.2 Separación de flujo
- 2.3 Semejanza geométrica, cinemática y dinámica
 - 2.3.1 Escalas y similitud
 - 2.3.2 Semejanza geométrica
 - 2.3.3 Semejanza cinemática
 - 2.3.4 Semejanza dinámica

Capítulo 3.

Factores que influyen en la experimentación con un túnel de viento.

- 3.1 Pruebas en túneles de viento, con tractocamiones
- 3.2 Diseño del túnel de viento
- 3.3 Teorema de Π Buckingham
- 3.4 Dimensión y unidades
- 3.5 Ejemplo para el tractocamión
- 3.6 Parámetros adimensionales
- 3.7 Coeficiente de arrastre en vehículos

Capítulo 4.

Fuerzas que intervienen en el desplazamiento de un vehículo

- 4.1 Fuerza aerodinámica



- 4.2 Fuerza de resistencia al rodamiento
- 4.3 Fuerza por pendiente
- 4.4 Fuerza de inercia
- 4.5 Fuerza centrífuga
- 4.6 Fuerzas de resistencia y la potencia del motor

Capítulo 5.

Pruebas de laboratorio

- 5.1 Diseño del experimento
- 5.2 Valores experimentales
- 5.3 Pruebas realizadas y resultados
- 5.4 Pruebas de visualización
- 5.5 Consumo de combustible

Capítulo 6.

Conclusiones y recomendaciones

Anexos

- (1) Características básicas del túnel de viento subsónico
- (2) Calculo del consumo de combustible

Bibliografía

Referencias

**Definición de problema:**

Determinar los coeficientes de arrastre, de diferentes configuraciones en un vehículo pesado, en un túnel de viento.

Hipótesis:

La implementación de mejoras en el diseño aerodinámico, reduce la resistencia aerodinámica de los vehículos pesados, lo cual impacta en el consumo de combustible directamente.

Objetivo:

Determinar experimentalmente el coeficiente de arrastre de un vehículo pesado.

Metodología:

- 1) Investigación bibliográfica.
- 2) Diseño del experimento.
- 3) Pruebas en modelo.



Introducción

La energía juega un papel fundamental en el desarrollo económico de un país. En este contexto, los datos más recientes del Balance Nacional de Energía son del año 2012, que constituye una pieza clave para la planeación energética nacional en el proceso de hacer de México un país con energía.

“El Balance Nacional de Energía presenta la producción y el consumo de energía a nivel nacional. Como tal, sirve de base para la formulación de la política energética nacional y constituye una herramienta fundamental para la planeación, análisis y evaluación del desempeño sectorial”.

El Balance Nacional de Energía presenta los datos energéticos relevantes a nivel nacional sobre el origen y destino de las fuentes primarias¹ y secundarias² de energía durante el año 2012, incorpora información útil para el análisis del desempeño del sector energético y para el diseño, formulación e implantación de políticas públicas en la materia.

Entre los resultados presentados, destacan la disminución de emisiones de bióxido de carbono por unidad de energía consumida, la reducción de la intensidad energética y la creciente participación de las energías limpias.³

En México el sector transporte ocupa un lugar relevante en el consumo de los productos petrolíferos, para el caso de la gasolina su participación es de 71 % y del diésel de 26%, (Tabla 1.1) Es fundamental realizar acciones sobre este sector para disminuir las tasas de consumo de combustible, que se han incrementado de manera importante los últimos años.

Tabla 1.1 Consumo de energía en el sector transporte
(Petajoules)

Combustible	Consumo PJ	%
Autotransporte	2,097.53	100.00
Gasolina	1,505.70	71.76
Diesel	556.63	26.53
Gas licuado	35.20	1.68
Gas seco	0.68	0.03

Fuente: Sistema de Información Energética. (Sener)

El *sector transporte* es uno de los consumidores fuertes en nuestro país en cuanto a combustible se refiere, como se muestra en la Tabla 1.2, se estima que consumió alrededor de 2,282 PJ, que representa un 47 % de la energía que se consumió en todo el país en 2012, que fue de 4,902 PJ. De este porcentaje la mayor parte lo consumió el *autotransporte*⁴ con 2,097 PJ, en la (Tabla 1.1) se describe a detalle tanto la cantidad como el porcentaje para cada combustible, para el sector transporte.

¹ Energía primaria: comprende aquellos productos energéticos que se extraen o captan directamente de los recursos naturales.

² Energía secundaria: derivados de las fuentes primarias, los cuales se obtienen en los centros de transformación.

³ <http://www.energia.gob.mx/indicadoreseficiencia.html>

⁴ Transporte: incluye la energía consumida en los servicios de transporte terrestre para el movimiento de personas y carga.



Tabla 1.2 Consumo final energético por sectores

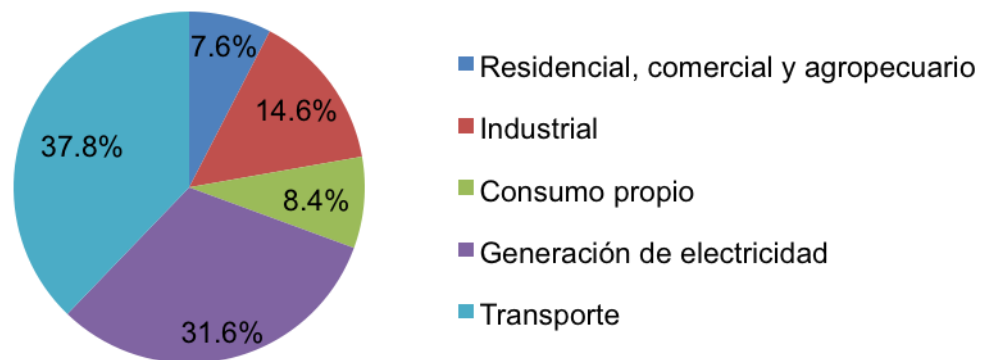
Sector	Consumo PJ	%
<i>Transporte</i>	2,282	47
Residencial, comercial y público	928	20
Industrial	1,363	29
Agropecuario	160	3
Total	4735.7	100

Fuente: Sistema de Información Energética (Sener).

A nivel mundial existe una gran preocupación por las consecuencias de los gases de efecto invernadero, uno de estos gases es el CO₂ (dióxido de carbono) el cual se genera por el uso de combustibles, generalmente de origen fósil como los hidrocarburos. Uno de estos efectos es el calentamiento global.

Como el sector transporte es uno de los sectores más consumidores de combustibles y por lo tanto también un gran generador de gases de efecto invernadero. Es por ello que en muchos países están considerando, la aplicación de normas a los vehículos automotores para tratar de reducir el consumo de combustible y también sus emisiones ya que dicho sector en el año 2012 contribuyó en un 37.8% del total de la emisiones de GEI, (Fig. 1.1).

Fig. 1.1 Estructura de las emisiones de GEI asociadas al consumo de combustible por sector, 2012.



Fuente: SENER e INECC. Cálculos propios utilizando la metodología del IPCC de 1996

Actualmente la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ha implementado un programa llamado "Transporte limpio"⁵, teniendo notables beneficios al promover la implementación de accesorios en vehículos de servicio pesado (VSP) que reducen la resistencia del aire al movimiento del vehículo, como el deflector de aire en el remolque y deflector de aire en el tractocamión, los cuales reducen el consumo de

⁵ <http://www.transportelimpio.gob.mx/>



combustible y por ende las emisiones. El uso del deflector de aire puede proporcionar una reducción del consumo de combustible entre un 5% y 10%⁶ (CONUEE).

Capítulo 1

Antecedentes: Aerodinámica en vehículos pesados

“Tecnologías y enfoques para reducir el consumo de combustible”

El transporte en México juega un papel importante en el uso de la energía y, por lo tanto, en el impacto ambiental debido a la enorme cantidad de combustible derivado del petróleo que se emplea en su operación (SENER, 2008).

Entre los problemas que afectan a la economía del sector de autotransporte en México, especialmente el destinado al servicio pesado, está el del alto consumo de combustible por lo que el costo por tonelada transportada ha sido impactado de manera significativa. En la operación de los vehículos de servicio pesado (VSP), la velocidad, la carga transportada, las resistencias al desplazamiento del vehículo, son elementos que tienen gran influencia en el consumo de combustible y, además, una influencia directa en la emisión de gases contaminantes.

Para las empresas de transporte, el consumo de combustible es uno de los factores más importantes en los costos de operación.

Un vehículo de carga recorre en promedio, al año 100,000 kilómetros y un autobús de pasajeros alrededor de 180,000 kilómetros. Dentro de los costos de operación el correspondiente al combustible representa en promedio un gasto del 40%, por lo que es pertinente tomar medidas que permitan una operación más eficiente del vehículo (CONAE, 1994).

Como ejemplo de lo anterior, se considera el diagnóstico realizado del consumo total de energía en un tractocamión con un peso de la carga de 36.3 toneladas durante una hora de operación. El recorrido se realizó en una carretera sin pendiente, siendo que el rendimiento del motor fue de 2.80 km/l y la velocidad de circulación del tractocamión fue de 105 km/h. El consumo total de energía fue de 400 kW-h y las demandas de energía para vencer las resistencias fueron; aerodinámica 85 kW-h, rodamiento de 51 kW-h, cadena cinemática 9 kW-h, las pérdidas en el motor fueron de 144 kW-h y en los auxiliares de 15 kW-h. La energía utilizada para transportar la carga fue de 96 kW-h, (Fig. 1.2), (Duleep, 2007). Por lo que es importante implementar mejoras en los aspectos antes mencionados para hacer un uso eficiente de la energía [6].

1.1 Balance de energía en el vehículo

El potencial de mejora en la eficiencia puede determinarse analizando las pérdidas de energía en el vehículo⁷. Las pérdidas de energía en el motor resultan principalmente del calor transferido al líquido de enfriamiento y el calor perdido en los gases de escape.

La energía remanente es utilizada para mover el vehículo y por las cargas auxiliares. Los accesorios son componentes esenciales para la operación del motor tales como: la bomba de agua y la de aceite mientras que las cargas auxiliares son accesorios utilizados

⁶ Eficiencia energética para el operador profesional, accesorios del vehículo.

⁷ Departamento de Energía (USA)



para la operación del vehículo tales como: la dirección hidráulica, el compresor de aire, el compresor del aire acondicionado, etc. [7].

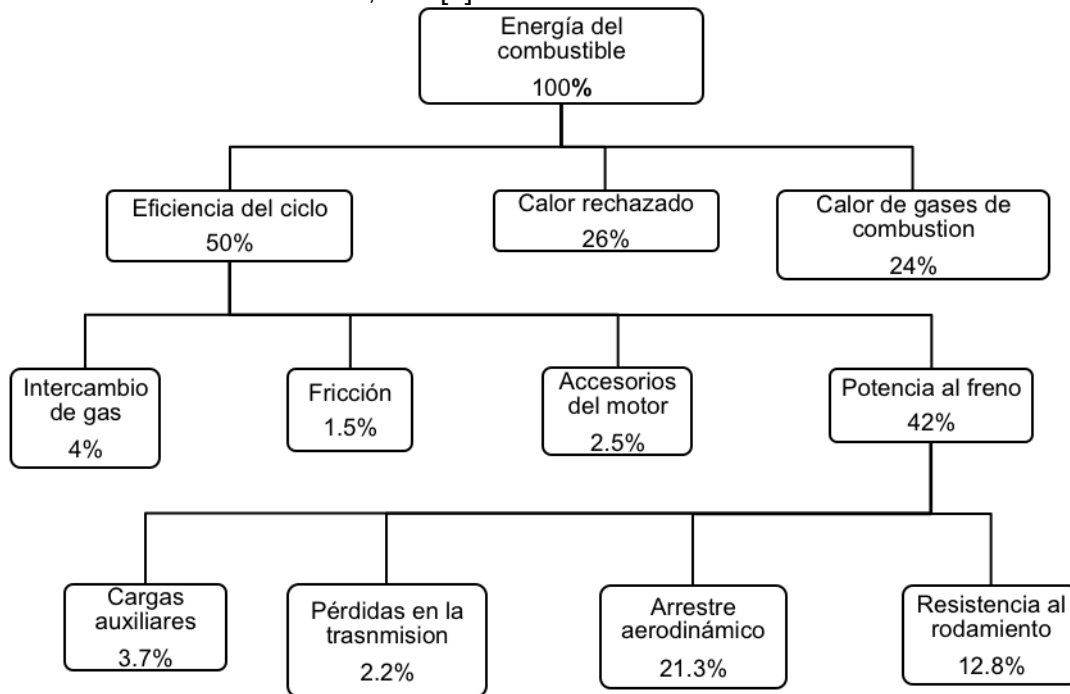


Fig. 1.2 Balance de energía para un vehículo T3–S2 (tractocamión con semirremolque) clase 8 completamente cargado 36.3 ton (peso bruto vehicular) y a 104.5 km/h con sistema de recuperación de calor [7].

Se observa que la resistencia aerodinámica es de 21.3% y la resistencia al rodamiento con 12.8% toman gran parte del total de la energía, esto implica que si se requiere reducir el consumo de combustible es necesario aplicar tecnologías enfocadas en estos puntos.

Fuente de energía	Línea base en [kWh]	Línea base en [Hp h]
Pérdidas en el motor por hora	240	321.8
Cargas auxiliares	15	20.1
En el tren motriz	9	12.1
Energía por resistencia aerodinámica	85	114
Energía por resistencia al rodamiento	51	68.4
Energía total utilizada por hora de uso	400	536.4

Tabla 1.3 Balance de energía para un vehículo clase 8 completamente cargado 36.23 ton y a 104.5 km/h [7].

Fuente de energía	Línea base en [kWh]	Línea base en [Hp h]
Pérdidas en el motor por hora	86.8	116.4
Cargas auxiliares	36.4	48.8
En el tren motriz	13.4	18
Energía por resistencia aerodinámica	1.3	1.7
Energía por resistencia al rodamiento	7.2	9.7
Energía total usada por hora de uso	145.1	194.6

Tabla 1.4 Balance de energía para un autobús de 12.16 m con media carga 14.5 ton, aplicando el aire acondicionado y en tráfico urbano, durante una hora [7].



1.2 Tecnologías vehiculares

De los balances de energía mencionados se ubican (5) áreas de pérdidas: aerodinámica, cargas auxiliares, resistencia al rodamiento, por el peso del vehículo, y reducción del ralentí (el motor trabajando y el vehículo detenido).

Carga	Potencia consumida (Hp)	Potencia consumida en %
Aerodinámica	114	53
Resistencia al rodamiento	68	32
Auxiliares	20	9
Tren motriz	12	6
Frenos	0	0
TOTAL	214	100

Tabla 1.5 Potencia consumida en la operación de un vehículo Clase 8 con cabina dormitorio a 106.9km/h y 36,320 kg de peso bruto vehicular [7].

Como se observa en la (Tabla 1.5) el 53% de potencia consumida en la operación del vehículo, es por la resistencia aerodinámica es por ello que desde 1965 se introducen los *deflectores de aire* en la cabina. En la (Fig. 1.3) muestran las líneas de corriente de un vehículo con deflector de aire y otro sin él, se observa que sin deflector algunas líneas de corriente se introducen en el espacio que existe entre la cabina y el semirremolque provocando arrastre. Cuando se añade el deflector (aproximadamente a 30°) existe un mejor penetración del vehículo en el fluido, con ello se obtiene una reducción significativa en consumo de combustible así como del coeficiente de arrastre. También cuando se hacen modificaciones en el remolque pueden obtenerse resultados favorables, (Fig. 1.3).



Modelo estandar de tractocamión



Modelo equipado con deflector



Modelo de camion sencillo estandar



Modelo de camión equipado con deflector tipo concha

Fig. 1.3 Líneas de corriente en túnel de viento con humo, sin deflector en la cabina (izquierda) y con deflector (derecha),



1.2.1 Deflector de aire

El deflector de aire es un accesorio que se coloca sobre la cabina, puede ser bidimensional o tridimensional. La caja debe ser más alta que la cabina para que sea efectivo. Su función aerodinámica es bastante evidente, suavizar la transición entre las dos citadas partes del vehículo. Para que la colocación sea eficaz al cabo de un tiempo debemos observar marcas oscuras en la carrocería, donde el flujo de aire vuelve a adherirse al vehículo, a continuación se muestran en la (Fig. 1.4) las diferentes alternativas de deflectores de aire⁸.

Fig. 1.4 Tipos de deflectores de aire para reducción de la fuerza de arrastre

	Modelo	Cd	% Reducción	Modelo	Cd	% Reducción	
A		0.863	-		0.656	24	G
B		0.663	23.2		0.629	27.1	H
C		0.660	23.5		0.820	22	I
D		0.657	23.8		0.673	22	J
E		0.668	22.6		0.568	34.1	K
F		0.680	21		0.609	29.4	L

Fuente: H. Hucho, "Aerodynamic of Road Vehicles", 1987.

Se observa en la (Fig. 1.4), se tiene un vehículo (A) cuya parte delantera debe ser modificada para hacerla más aerodinámica y se observa también que el semirremolque del mismo vehículo posee una superficie rugosa. Para realizar la mejora, se experimentó con varias formas aerodinámicas y rugosidades del semirremolque, de los cuales la alternativa (K) es la más conveniente debido a que se logró el mayor porcentaje de reducción del coeficiente de arrastre igual a 34,1% respecto de la forma original (A).

La forma (K) consiste en la instalación de una forma geométrica denominada *cobertor aerodinámico* el cual es instalado sobre la cabina y que va acompañado de un redondeo de los filos laterales del semirremolque. Se debe notar también que la rugosidad del semirremolque ha sido disminuida.

⁸ The aerodynamics of basic shapes for road vehicles.



En el caso de vehículos 5a rueda otras alternativas son:

- Cofres aerodinámicos
- Defensas aerodinámicas
- Carrocerías aerodinámicas
- Cubiertas laterales aerodinámicas
- Extensiones de cabina
- Techos aerodinámicos
- Espejos laterales aerodinámicos

El desarrollo de características aerodinámicas condujo a una necesidad de procedimientos de prueba que podrían cuantificar el rendimiento de estas características.

La mayoría de los estándares de la industria se han desarrollado a través del proceso de consenso por la *Sociedad de Ingenieros Automotrices* (SAE⁹) y son de las más ampliamente utilizadas.

Algunos de los procedimientos de prueba para evaluar algunos parámetros aerodinámicos son:

- 1.- SAE J1263 prueba de desaceleración en pista (Coast down test on track)
- 2.- SAE J1252 para pruebas en túnel de viento
- 3.- SAE J1321 prueba para evaluar el consumo de combustible

1.- Procedimiento SAE J1263 prueba de desaceleración en pista (Coast down test on track) permite determinar el coeficiente de arrastre C_d del vehículo y el coeficiente de rodamiento C_{rr} , es importante mencionar que esta prueba se aplica a automóviles, sin embargo al principio se aplicaba a vehículos pesados; pero su nivel de incertidumbre y de repetitividad hace que este procedimiento no sea adecuado para vehículos pesados.

2.- Desde 1981 la SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices) recomendaba el procedimiento SAE J1252 para pruebas en túnel de viento, en él se puede determinar el valor medio del arrastre y los efectos de vientos laterales. Además de que en el túnel de viento se pueden hacer pruebas con todo el vehículo (*tracto con semirremolque y tracto con doble semirremolque*).

3.- En 1986 la SAE y el consejo de mantenimiento de camiones (Truck Maintenance Council TMC) proponen el Procedimiento de prueba para evaluar el consumo de combustible SAE J1321 el cual, determina el consumo de combustible de un vehículo de prueba en condiciones de servicio real con un vehículo de control.

Este procedimiento permite la corrección de parámetros que están fuera de control del desarrollo de los investigadores, y que intervienen en la prueba como las condiciones ambientales y el viento.

El coeficiente de arrastre para tractocamiones diseñados aerodinámicamente con esquinas redondeadas es del orden de 0.6 a 0.65 (para automóviles los valores típicos son de 0.3 a 0.4).

⁹ www.saemexico.org



1.2.2 Mejoras tecnológicas en la aerodinámica de un vehículo pesado

La métrica estándar para comparar las pérdidas aerodinámicas es el coeficiente de arrastre, C_d . Los diseñadores de vehículos buscan minimizar el coeficiente de arrastre con el fin de reducir el consumo de combustible de los vehículos a velocidades más altas, donde la resistencia aerodinámica representa una fracción sustancial de la energía necesaria para mantener el vehículo en movimiento.

Coefficientes de arrastre para (VSP) con diseño aerodinámico actuales con semirremolque con esquinas redondeadas son aproximadamente 0.6 a 0.65, que es superior a los valores que se encuentran normalmente en los vehículos ligeros. La mayoría de los sedanes de automóviles actuales alcanzan un C_d de aproximadamente 0.3 a 0.4, y el C_d de los SUV (sport utility vehicles) es típicamente de 0.4 a 0.5. Los valores más altos de C_d para vehículos pesados se deben principalmente al hecho de que son esencialmente grandes cajas optimizadas para el movimiento de mercancías.

Los valores de los coeficientes de arrastre se miden generalmente en pruebas de túnel de viento. El C_d de un vehículo facilita directamente el cálculo de la pérdida de energía aerodinámica. Además, la prueba de túnel de viento puede proporcionar un método relativamente simple y preciso para evaluar los efectos del viento lateral (yaw¹⁰) en el C_d de un vehículo (Cooper, 2004). Un proceso preciso y repetible para establecer los valores de C_d es esencial para la exitosa aplicación de modelos informáticos de todo el camión para evaluar, la eficacia del consumo de combustible de varios dispositivos para reducir la resistencia al avance.

Cada fabricante de tractocamiones ha desarrollado procesos internos para validar el rendimiento técnico de sus soluciones aerodinámicas. Los fabricantes no publican los valores de C_d evidentemente porque los procedimientos utilizados por diferentes fabricantes no son compatibles para ser directamente comparables. Los fabricantes no han acordado utilizar un estándar común, tal como el SAE J-1252.

1.2.3 Pérdidas de energía

La potencia para vencer la resistencia aerodinámica está dada por la siguiente relación.

$$\text{Potencia aerodinámica} = \frac{1}{2} \rho C_d A V^3$$

Donde

ρ densidad del aire

C_d coeficiente de arrastre

A área frontal del vehículo (área proyectada)

V velocidad del vehículo

¹⁰ "Guiñada" se refiere a un viento cuya dirección es no directamente en línea con el movimiento hacia adelante del vehículo (es decir, un viento lateral).



Una reducción de un 20% en el coeficiente de arrastre, provoca una reducción del 10% en el consumo de combustible a una velocidad de 104.5 km/h.

La potencia requerida para vencer la resistencia al rodamiento está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia por rodamiento} = C_{rr} W V$$

Donde

C_{rr} coeficiente de fricción entre la rueda y el camino

W peso bruto vehicular

V velocidad del vehículo

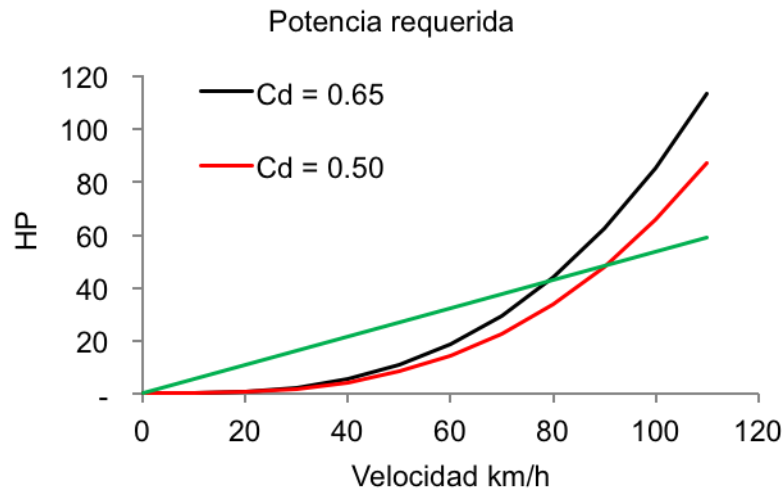


Fig. 1.5 Potencia requerida para vencer la resistencia aerodinámica con un C_d de 0.65 y de 0.52 y por rozamiento (línea recta) [6]

1.2.4 Área frontal de vehículos pesados

Los vehículos pesados tienen altos valores de C_d en comparación de los vehículos ligeros, esto en gran medida radica en que su área frontal es de 3 a 3.7 veces más que los vehículos convencionales. La gran área frontal tiene su fundamento por la necesidad de transportar una gran capacidad de carga útil.

Como resultado, la potencia requerida para un vehículo de tales dimensiones es de 4.7 a 7.7 más, en comparación con un vehículo ligero.

La resistencia aerodinámica es mayor que la resistencia al rodamiento a velocidades superiores a 72.42 km/h en un camión típico. Sin embargo a 32 kilómetros por hora la resistencia aerodinámica es sólo la mitad de la resistencia a la rodadura y la resistencia aerodinámica se vuelve insignificante a bajas velocidades.

1.2.5 Zonas para mejorar

Existen 4 zonas de la combinación tractor – trailer para mejorar el diseño aerodinámico, estas regiones incluyen: detalles relacionados con el tractor, la distancia de separación



entre tracto y semirremolque (trailer), la cubierta del tracto y la envolvente de la base del semirremolque.

Tecnología	Reducción en % en el consumo de combustible	Mejoramiento del Cd en %	Costo (dólares) (\$ pesos)	Tasa de adopción en la industria en %
Deflector de cabina para cabina de día	4-7	13	1,000-1,300 (\$14,000 - \$19,000)	Muy estándar
Cubierta para cabina dormitorio	7-10	15-20	500-1,000 (\$7,000 - \$14,000)	Muy estándar
Extensión de chasis	3-4	4-7	1,500-2,000 (\$22,000 - \$29,000)	50-60
Extensión de cabina	2-3	4-5	300-500 (\$4,400 - \$7,000)	80-90
Paquete de nueva generación	3-4	6-8	2,750 (\$ 40,000)	Introducción en 2012

Tabla 1.6 Tecnologías para mejorar la aerodinámica de vehículos pesados clase 8 tractocamiones [7]

Los fabricantes de vehículos han tratado de incluir estas mejoras en sus vehículos y son muy visibles los cambios aerodinámicos. En la (Fig. 1.6) se muestra un tractocamión *Peterbilt tradicional* modelo 389 (izquierda) y otro modelo 387 2 aerodinámico (derecha).

Se puede observar el diseño aerodinámico de la cabina, de los espejos, la defensa, la cubierta de los tanques de combustible y del camarote (dormitorio).



Fig. 1.6 Tractocamión Peterbilt tradicional modelo 389 (izquierda) y modelo 387 2 aerodinámico (derecha) [7].

En la (Tabla 1.7) se muestra el rango de mejora en la economía de combustible de diferentes tecnologías: camisas, colas de barco, deflector tipo concha, estabilizador de vórtices y cubierta bogie así como el rango de costos de las mismas.



Tecnología para el trailer	Camisas	Colas de barco	Deflector tipo concha	Estabilizador de vórtices	Cubierta bogie
Rango de mejora en la economía de combustible (% mpg)	5.6-7.5	2.9-5	2-4	1	1
1Rango de costos	1,600-2,400 dólares	n/a	800-1,260	500	n/a

Tabla 1.7 Desempeño de los componentes aerodinámicos para el semirremolque tipo caja ⁷¹

En la (Fig. 1.7) se muestran dos tecnologías: “las camisas” para el trailer a la izquierda y “la cola de barco” a la derecha.



Fig. 1.7 Camisa de trailer (izquierda) y cola de barco (derecha).

Deflector tipo concha (ojiva (nose cone¹¹))

El deflector tipo concha (Fig. 1.8) reduce la turbulencia que genera el viento en la parte superior de la cabina o dormitorio.



Fig. 1.8 Deflector tipo concha

Estabilizador de vórtices¹²

¹¹ <http://www.nosecone.com/index.htm>



Estabilizador de vórtices (Fig. 1.9) permite reducir la separación entre la cabina del tracto y el semirremolque y reducir la turbulencia que se puede generar en esta zona



Fig. 1.9 Estabilizador de vórtices

Cubierta tipo “bogie”¹³

La cubierta tipo “bogie” generalmente evita la turbulencia que generan las llantas al girar y al ponerse en contacto con el aire (Fig. 1.10).



Fig. 1.10 Cubierta tipo bogie [7]

Muchos de los accesorios para mejorar la aerodinámica del tracto o del trailer pueden ser dañados en operaciones de baja velocidad (por ejemplo al estacionarse) y el costo de la reparación puede ser una barrera para su implementación generalizada.

1.3 Cargas auxiliares

El aire comprimido es necesario para el sistema de frenos, el aire acondicionado es usado para el confort del operador y de los pasajeros en el caso de los autobuses, la dirección hidráulica requiere energía del motor para su funcionamiento, el alternador es usado para cargar la o las baterías del vehículo, estos elementos forman las cargas auxiliares.

La bomba de agua de enfriamiento, la de combustible, y la del aceite lubricante se definirán como carga de accesorios.

¹² <http://www.laydoncomp.com/nose-fairing-vortex-stabilizer.php>

¹³ <http://www.nap.edu/>



El mejoramiento de los sistemas auxiliares y el uso de equipos eléctricos en lugar de sistemas mecánicos, acoplados directamente a la máquina ofrecen un potencial de reducción en el consumo de combustible.

1.4 Resistencia al rodamiento

La fuerza de resistencia al rodamiento se debe principalmente, a la deformación de la llanta cuando hace contacto con el piso y a las fuerzas de compresión y cortante que se generan. Esta fuerza es proporcional a la carga sobre la llanta y esto permite definir un coeficiente de resistencia al rodamiento C_{rr} definido como, el cociente de la fuerza axial resistiva y la fuerza normal.

Para una llanta dada, el C_{rr} es medianamente dependiente de la temperatura, el uso y la velocidad, sin embargo la presión de inflado tiene un alto impacto en él.

El C_{rr} es altamente dependiente de la tecnología de la llanta y se ha expresado como el cociente de la fuerza de resistencia al rodamiento por tonelada métrica de carga, y el rango de valores está entre 4 kg/ton y 8 kg/ton.

La alineación de cada eje tiene un impacto directo sobre la resistencia al rodamiento, los efectos de la desalineación pueden resultar en ángulos de deslizamiento, provocando un efecto negativo en el desgaste de los neumáticos y en la maniobrabilidad del vehículo.

1.5 Peso vehicular

El peso del vehículo (peso en vacío más el peso de la carga) afecta el consumo de combustible y esto es más relevante en ciclos de trabajo de arranque y paro continuo o en las condiciones de operación. Por ejemplo un vehículo con un peso bruto vehicular de 36,320 kg y con una velocidad de 80 km/h en terreno plano requiere 150 hp de potencia, pero el mismo vehículo y con las mismas condiciones de velocidad y carga pero, manejado sobre un terreno con una pendiente de 3 grados requerirá 450 hp de potencia (triplica la necesidad de potencia) (Caterpillar 2006).

Un tractocamión clase 8 con cabina dormitorio con un peso de 16,000 a 19,000 lb y un semirremolque (trailer no refrigerado) con un peso típico de 14,000 lb (6,356 kg) se presenta la distribución de pesos correspondiente en la (Fig. 1.11).

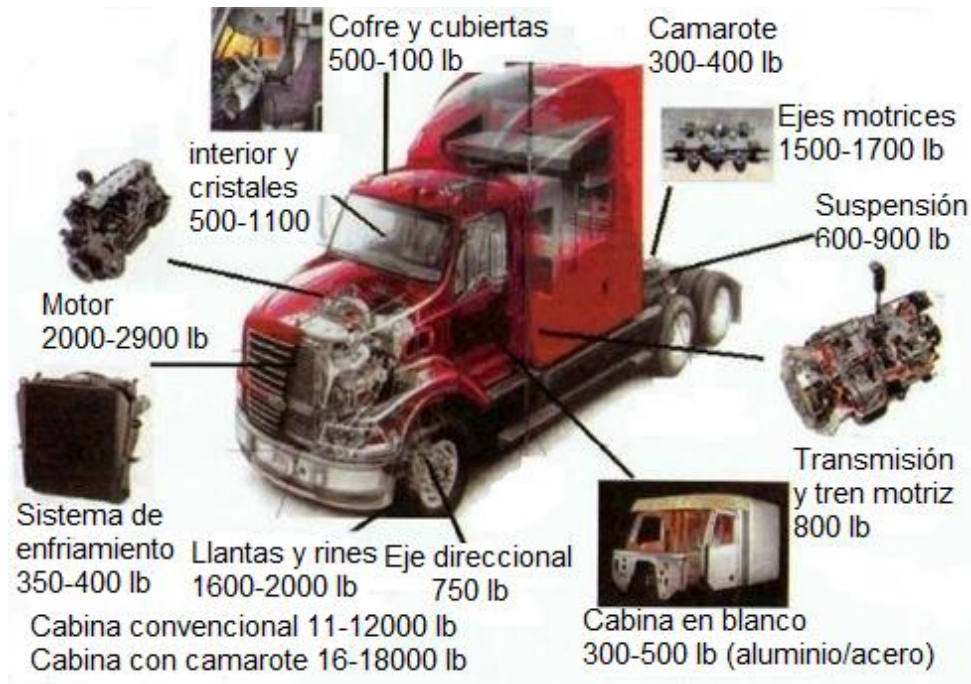


Fig. 1.11 Distribución de pesos de un vehículo clase 7/8 [7].

En la (Fig. 1.12) se presenta la distribución del peso de los diferentes componentes de un vehículo clase 8, el mayor porcentaje corresponde al tren motriz en el cual se incluyen el motor con su sistema de enfriamiento y la transmisión.

Distribución de pesos (17 ton) en %

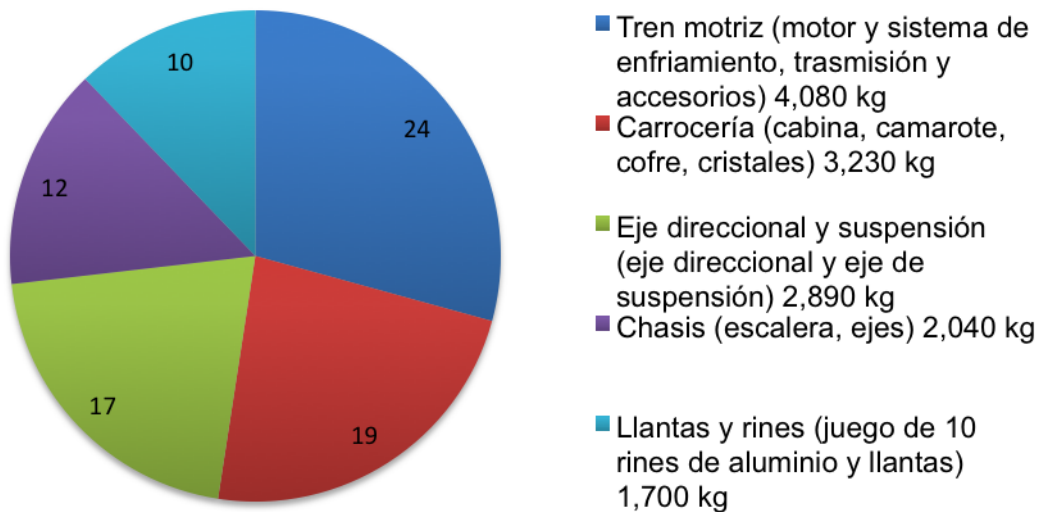


Fig. 1.12 Distribución de pesos de un vehículo clase 8, [7]



El peso del vehículo impacta en la potencia necesaria para propulsar el camión a través del camino, venciendo la resistencia al rodamiento, el grado de pendiente y las aceleraciones.

Una ventaja de la reducción del peso es la habilidad de parte del fabricante de mantener los límites de carga por eje, 15,436 kg para un eje doble (tandem) y 9,080 kg para un eje sencillo. Los paneles compuestos de aluminio han sido introducidos a los trailers y el uso de madera ha disminuido, otros elementos que pueden ser sustituidos son: las puertas, el techo del camarote, la cubierta del piso del tractocamión, paredes laterales, puertas traseras, rines de acero, pared trasera de la cabina, etc. (Fig. 1.13).



Fig. 1.13 Reducción del peso del vehículo por el uso de aluminio en algunas partes de la unidad [7]

1.6 Reducción del Ralentí

La marcha en ralentí (el motor trabajando y el vehículo detenido) desperdicia combustible y dinero. Un tractocamión en ralentí consume más de 4.5 litros de combustible en una hora. Los pick-ups y camiones de reparto queman de 20 a 40 % de su combustible total al mantenerse en marcha en ralentí.

Los largos periodos de marcha en ralentí dañan el motor. Un motor diésel que permanece en ralentí por más de 3 minutos, puede ensuciar los inyectores y hacer que pierda potencia y eficiencia (CONUEE).

Las tecnologías para reducir el ralentí utilizan un poco de la energía del motor para mover los sistemas auxiliares.

Las tecnologías para reducir el ralentí pueden ser clasificadas en 5 categorías:

- Sistemas automáticos de encendido apagado
- Bancos de baterías
- Calentadores a base de combustible
- Unidades auxiliares de energía o conjuntos de generadores
- Paraderos de camión electrificados



Los sistemas de control del ralentí de arranque y paro, monitorean la temperatura de la cabina y arrancan o paran el motor para mantener la temperatura deseada, también si no detectan actividad en el manejo (pisar freno, o acelerador) apagan el motor.

Bancos de baterías

El sistema de reducción del ralentí por el uso de banco de baterías utiliza cualquiera de los siguientes métodos, emplea la propia batería del vehículo o incorpora un banco de baterías para el calentamiento y/o enfriamiento de la cabina, el sistema provee energía para 8 o 12 horas.

El sistema de Kenworth se denomina potencia limpia (Clean power) y el operador puede obtener un 8% de reducción en el consumo de combustible. Los sistemas típicos utilizan baterías de litio.

Calentadores a base de combustible

También conocidos como calentadores a fuego directo, están disponibles para calentar la cabina, el motor o ambos, estos calentadores usan una cantidad mucho más pequeña de combustible que la utilizada para mantener el motor funcionando y calentar la cabina con el calor de desecho de la combustión.

Unidades auxiliares de energía (APU)

Estos equipos proveen energía eléctrica y calor por medio de una pequeña planta de energía equipada con un generador eléctrico, también pueden accionar sistemas de aire acondicionado.

Paraderos de camión electrificados

Estos lugares proveen a los camioneros de sistemas para conectarse a las plantas de aire acondicionado, luces y otros accesorios, para no utilizar el motor del vehículo.



Capítulo 2

Conceptos básicos de mecánica de fluidos

La *aerodinámica* es una rama de la dinámica de gases, la cual estudia la interacción entre los cuerpos y el aire en movimiento o *flujo de aire*. Comprender los fenómenos que acompañan al flujo de aire sobre los cuerpos, permite el cálculo de fuerzas y momentos que actúan sobre el cuerpo.

El cuerpo sólido u objeto en este estudio, es el vehículo de servicio pesado: Tomando como referencia un (VSP) que se desplaza por la carretera a una velocidad determinada se producen dos tipos de flujos de aire debido a su movimiento: *flujo externo* y *flujo interno*.

El *flujo externo* es aquél que se produce alrededor del vehículo y es el principal responsable de la generación de fuerzas y momentos sobre el mismo; las fuerzas y momentos generados tiene su origen en el *patrón de flujo* del aire sobre el vehículo.

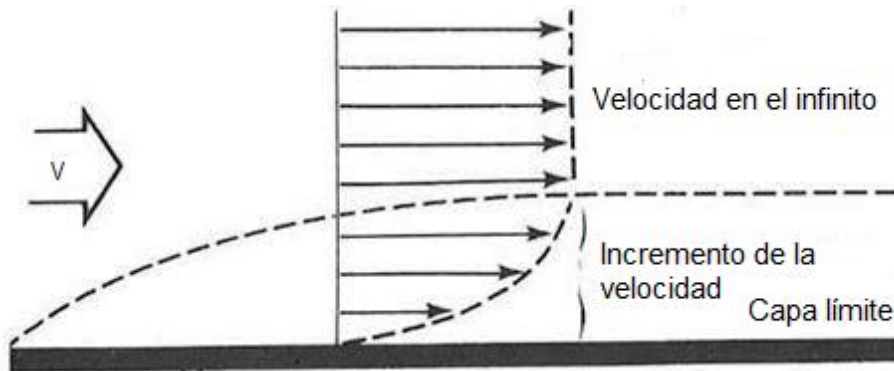
El *flujo interno* es aquel que ingresa al vehículo por diversos ductos y tuberías y es utilizado para el sistema de enfriamiento del motor, sistemas de ventilación y aire acondicionado.

2.1 Capa limite

La *capa límite* es una delgada región cerca de una pared sólida en la se sienten los efectos de los esfuerzos cortantes viscosos provocados por la viscosidad del fluido y dentro de la cual el flujo es rotacional.

El espesor de la capa limite es la distancia desde la pared a la cual la velocidad es no más de un 1 por ciento diferente que la velocidad no perturbada, la cual aumenta en la dirección del flujo, (Fig. 2.1).

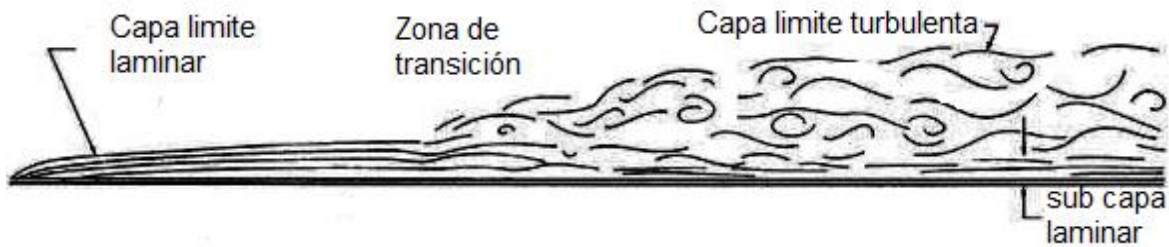
En 1904 el alemán Ludwin Prandtl (1875 - 1953) demostró que los flujos de los fluidos se pueden dividir en una capa cercana a los bordes, la capa límite, donde los efectos de la viscosidad son importantes. Otra alejada de los bordes en la cual el flujo no depende de la viscosidad del fluido.



(Fig. 2.1) Comportamiento de la velocidad bajo el efecto de capa limite.



La *capa límite* inicialmente es laminar, después hay una zona de transición y finalmente puede ser totalmente turbulenta si el flujo fuera de ella, lo es, como se muestra en la (Fig. 2.2). Al punto donde la capa límite se transforma de laminar a turbulenta se le conoce como punto de transición. Además, como la adherencia del fluido con la pared exige que en contacto con ella la velocidad sea nula, se puede suponer que, incluso en la capa límite turbulenta, cerca de la pared haya una zona de flujo laminar debido a que en ella las velocidades son muy bajas. Esta se conoce como sub capa laminar.



(Fig. 2.2) Desarrollo de la capa límite sobre una placa plana

Zona de transición

En el interior de la capa límite, la distribución de velocidades es afectada por la pared. Fuera de ella la pared no tiene influencia. Al encontrarse el fluido con la pared comienza a detenerse y este efecto se va propagando hacia el interior del flujo, de manera que el espesor de la capa crece.

La *capa límite* tiene una propiedad fundamental y muy útil, y es que a través de ella se transmite la presión que existe en la corriente libre de aire hasta la pared, esto permite entre otras cosas la medida de la velocidad, ya que se puede medir la presión estática.

Para caracterizar este tipo de escurrimiento se usa el número de Reynolds, pero adaptado como medida de longitud la distancia a lo largo de la cual se ha desarrollado la capa límite. Las condiciones de escurrimiento en su interior dependen de una gran cantidad de factores, como lo son las características de la superficie de contacto, su rugosidad, curvatura, transferencia de calor, gradiente de presiones y otro tipo de perturbaciones.

Se ha demostrado, tanto empírica como analíticamente mediante la aplicación del teorema de cantidad de movimiento, que el espesor de la capa límite laminar se puede calcular mediante la expresión:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5.48}{R^{0.5}}$$

Donde x es la distancia desde el inicio de la pared y R en número de Reynolds de la capa, el que se evalúa como:

$$R = \frac{V_x}{\nu}$$

Otro aspecto importante del flujo en el interior de la *capa límite* es conocer la distribución de velocidades cerca de la pared, ya que ella condiciona el valor del esfuerzo de corte y



por lo tanto, las pérdidas por fricción y las fuerzas de roce entre el flujo y los bordes sólidos. En un flujo laminar la distribución es parabólica.

Con base en la teoría de la capa límite se pueden conocer los esfuerzos viscosos producidos por el fluido en movimiento sobre bordes sólidos. La fuerza total que hace un fluido sobre una superficie plana se puede evaluar sumando los esfuerzos de corte en la pared de contacto y agregando a ello el efecto de la distribución de presiones. Este esfuerzo de corte que se produce en las superficies de contacto entre el fluido en movimiento y los bordes sólidos, debido a la presencia de la viscosidad del fluido, es el responsable de los fenómenos de pérdidas de energía por fricción y de fuerzas de arrastre sobre cuerpos sumergidos, se muestra un ejemplo del crecimiento de la capa límite en el cofre de un vehículo, (Fig. 2.3).

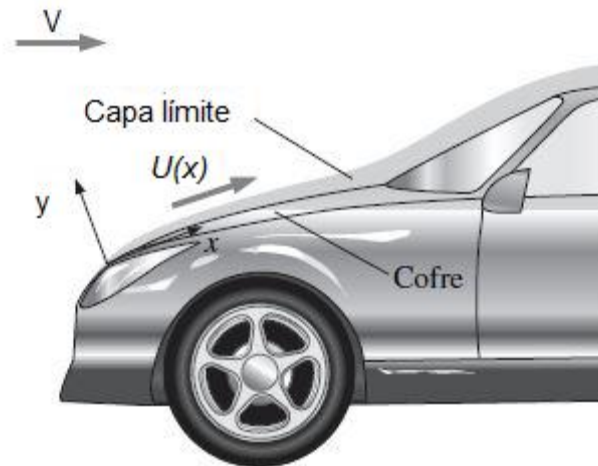


Fig. 2.3 Capa límite que crece sobre el cofre de un automóvil. Para que se observe con claridad se exagera el espesor de la capa límite.

2.2 Separación de flujo

Cuando se maneja en las autopistas, una medida de seguridad común es frenar en las vueltas cerradas con la finalidad de evitar salirse del camino. Muchos conductores han aprendido del modo difícil que un automóvil se rehusará a obedecer cuando se fuerza a tomar las curvas a excesiva velocidad. Este fenómeno puede verse como “la separación de los autos” de las carreteras. Éste también se observa cuando vehículos a alta velocidad saltan de las colinas. A bajas velocidades, las llantas del vehículo siempre permanecen en contacto con la superficie del camino. Pero, a altas velocidades el vehículo va demasiado rápido para seguir la curvatura del camino y despega en la colina, con lo que pierde contacto con el camino.

Un fluido actúa en gran parte de la misma manera cuando se le fuerza a fluir sobre una superficie curva a altas velocidades. Un fluido asciende por la porción de la superficie curva colina arriba sin problema, pero tiene dificultad en permanecer unido a la superficie colina abajo. A velocidades suficientemente altas, el flujo de fluido se separa por sí mismo de la superficie del cuerpo. A esto se le llama separación de flujo. El flujo se puede separar de una superficie, inclusive, si está totalmente sumergido en un líquido o inmerso en un gas (Fig. 2.4). La ubicación del punto de separación depende de varios factores, como el número de Reynolds, la rugosidad de la superficie y el nivel de fluctuaciones en el



flujo libre, sin embargo, es difícil predecir exactamente dónde ocurrirá la separación a menos que existan esquinas agudas o cambios abruptos en la forma de la superficie sólida.

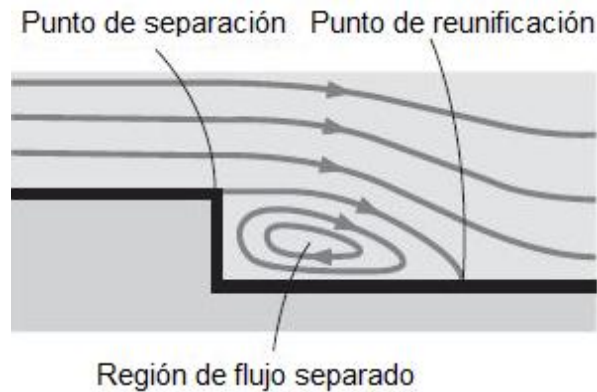


Fig. 2.4. Separación de flujo sobre un escalón a lo largo de una pared.

Cuando un fluido se separa de un cuerpo, forma una región separada entre el cuerpo y el flujo del fluido. *Esta región de baja presión detrás del cuerpo, donde ocurren la recirculación y el flujo de vuelta, se llama región separada. Cuanto más grande sea la región separada, mayor será el arrastre debido a presión.* Los efectos de la separación de flujo se sienten lejos corriente abajo en forma de velocidad reducida (relativa a la velocidad de flujo corriente arriba). La región de flujo atrás del cuerpo donde se sienten los efectos del cuerpo sobre la velocidad se llama estela (Fig. 2.5). La región separada termina donde las dos partes separadas de flujo vuelven a unirse. Por lo tanto, la región separada está en un volumen cerrado, mientras que la estela continúa creciendo detrás del cuerpo hasta que el fluido en la región de estela vuelve a alcanzar su velocidad y el perfil de velocidad de nuevo se vuelve casi plano. Los efectos viscosos y rotacionales son los más significativos en la capa límite, la región separada y la estela.

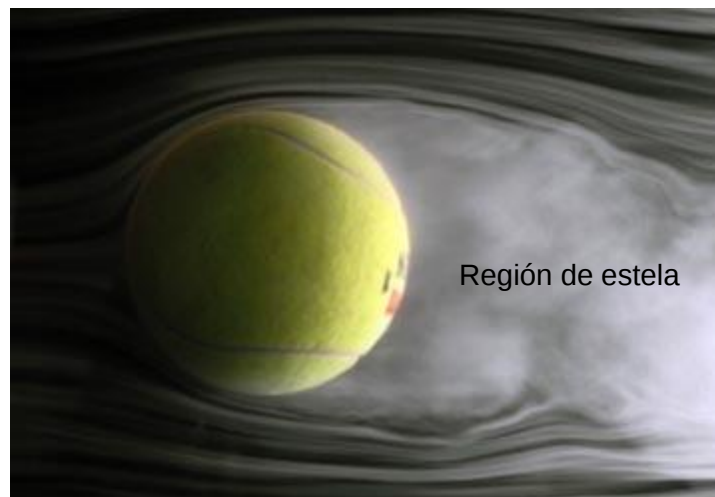


Fig.2.5, Separación de flujo sobre una pelota de tenis y la región de estela.
Cortesía de NASA y Cislunar Aerospace, Inc.

El hecho de la separación no se limita a cuerpos romos. La separación completa sobre toda la superficie posterior también puede suceder en caso de un cuerpo currentilíneo,



como el ala de un avión a un ángulo de ataque suficientemente grande (casi 15° para la mayoría de las superficies de sustentación), que es el ángulo que el flujo de fluido entrante forma con la cuerda (la línea que conecta los dos extremos) del ala. La separación de flujo sobre la superficie superior de un ala reduce la sustentación de manera drástica y puede provocar que el avión pierda sustentación o entre en pérdida. A esta pérdida se le ha culpado de provocar numerosos accidentes de aviación y empeorar eficiencias en turbomaquinaria.

El arrastre y la sustentación son sumamente dependientes de la forma del cuerpo, y cualquier alteración que provoque el cambio de forma tiene un importante efecto sobre el arrastre y la sustentación. Por ejemplo, la acumulación de nieve y la formación de hielo sobre las alas de los aviones puede cambiar la forma de éstas lo suficiente como para provocar una considerable pérdida de sustentación. Este fenómeno ha causado que muchos aviones pierdan altitud y choquen y, que otros tantos aborten el despegue. Por lo tanto, la comprobación de acumulación de hielo y nieve sobre componentes cruciales de los aviones se ha convertido en una medida de seguridad rutinaria antes del despegue en climas fríos. Esto es especialmente importante para aviones que han esperado su despegue durante mucho tiempo en la pista de aterrizaje debido al tráfico intenso. Una consecuencia importante de la separación de flujo es la formación y desprendimiento de partes de fluido circulante, llamados *vórtices*, en la región de estela.

2.3 Semejanza geométrica, cinemática y dinámica

En mecánica de fluidos la experimentación tiene una gran importancia, y hasta la fecha se puede decir que los resultados más importantes que existen actualmente son producto de análisis experimentales. A pesar de que cada vez los análisis por medio de computadoras son más comunes. Una muestra de los beneficios de la experimentación en dicha área son los que se realizan en prototipos con el fin de ver los efectos posibles en modelos reales.

De hecho antes de construir aparatos u obras de alto costo – tales como barcos, aviones, puertos, represas, etc. Se puede recurrir a ensayos en modelos para observar sus características bajo condiciones de operación que no han podido ser estudiadas analíticamente, u observar el efecto de fenómenos imposibles de considerar en un estudio más simplificado. En el modelo se realizan muchas medidas de diferente tipo para evaluar la calidad del diseño. Así es como se acostumbra medir fuerzas sobre estructuras, presiones en puntos especiales, velocidades, etc. Para que estas medidas en los modelos sean útiles, es necesario poder transformarlas a valores a la escala del fenómeno original. Si ello no se puede hacer, el valor de medir esas propiedades en el modelo es muy reducido. Por otra parte, aunque se pueda tener una idea de las características de los ensayos que se desean realizar a la escala del prototipo, se requiere conocer la magnitud de las variables a que se debe someter el modelo para reproducir el mismo fenómeno. Por ejemplo, si se desea ensayar el modelo a escala de un avión que deberá volar a 900 km/hrs aparecen dos preguntas básicas. La primera consiste en saber a qué velocidad deberá ensayarse el modelo para reproducir las condiciones del prototipo. La segunda es saber que fuerza de arrastre le correspondería al prototipo si se logra medir una en el modelo. La respuesta a este tipo de preguntas se basa en la idea de que ambos fenómenos deben ser físicamente similares.



2.3.1 Escalas y similitud

La semejanza mecánica total entre dos representaciones de un mismo fenómeno físico, para el cual los valores de los parámetros adimensionales son iguales, lleva implícita la semejanza geométrica, cinemática y dinámica entre ambos. Esto es, que las formas sean semejantes, que los movimientos sean similares y que las fuerzas involucradas se encuentren en las mismas proporciones.

Para trasladar las medidas de las variables entre el prototipo y el modelo, se requiere conocer la escala a la cual se encuentra cada variable. Se denomina escala de una variable a la razón entre el valor de ella en el modelo y su valor en el prototipo en condiciones semejantes.

Para ser más precisos, se puede suponer que un punto de coordenadas (x, y, z) en el prototipo, tiene un punto homólogo en el modelo con coordenadas (α, β, δ) y que al instante t en el prototipo, le corresponde un instante τ en el modelo. Si en ambos puntos, en instantes también homólogos. Se mide el valor de la misma variable, a_m en el modelo y a_p en el prototipo, la escala de esa variable para ese punto en ese instante. E_a , es:

$$E_a = \frac{a_m(\alpha, \beta, \delta)}{a_p(x, y, z)}$$

Cuando el modelo y el prototipo son semejantes, la escala de la variable “a” no depende de las coordenadas de los puntos ni del tiempo de la medida. Cada variable puede tener su propia escala pero ella debe ser única para toda posición e instante.

El análisis dimensional sugiere que los valores de “a” se pueden expresar en función de parámetros adimensionales mediante una relación funcional, que es la misma en el modelo y prototipo si el fenómeno es esencialmente el mismo. Por otra parte, si el modelo y el prototipo son semejantes, los valores de los parámetros adimensionales son iguales. Así, al igualar numéricamente los valores de los parámetros adimensionales, en el prototipo y el modelo se imponen relaciones entre las escalas de las variables involucradas en cada grupo adimensional. Este procedimiento es el que se emplea para determinar las escalas de cada una de las variables involucradas [1].

2.3.2 Semejanza geométrica

La semejanza geométrica se refiere a la dimensión $\{L\}$ y debe asegurarse que se cumple antes de proceder a los ensayos de cualquier modelo. Aunque la similitud geométrica se extiende a la rugosidad superficial real del modelo y el prototipo.

Un modelo y un prototipo son geoméricamente semejantes si, y sólo si, todas las dimensiones espaciales entre coordenadas tienen la misma relación de escala lineal. En la semejanza geométrica todos los ángulos se conservan. Todas las direcciones de flujo se conservan. La orientación del modelo y el prototipo con respecto a los objetos de los



alrededores debe ser idéntica. Se pueden obtener buenos resultados si los números de Reynolds, Froude, Weber y Mach deben ser los mismos.

2.3.3 Semejanza cinemática

La semejanza cinemática impone que los movimientos en ambos casos sean iguales. Ello requiere que las líneas de corriente sean de igual forma. Es decir, la línea de corriente que en el instante t pasa por un punto (x, y, z) , en el prototipo debe tener la misma forma, ser geoméricamente semejante, que la línea que en instante τ pasa por el punto (u, β, δ) en el modelo, donde los puntos y los tiempos considerados son homólogos.

2.3.4 Semejanza dinámica

Existe semejanza dinámica cuando modelo y prototipo tienen la misma relación de escala de longitudes, la misma relación de escala de tiempos y la misma relación de escala de fuerzas (o de masa). De nuevo la semejanza geométrica es un requisito; en caso contrario, no se puede proseguir. La semejanza dinámica existe simultáneamente con la semejanza cinemática, si todas las fuerzas del modelo y el prototipo guardan la misma proporción. Esto ocurre si

- a) *Flujo compresible*: los números de Reynolds y Mach del modelo y el prototipo y la relación de calores específicos son iguales.
- b) *Flujo incompresible*:
 - a. *Sin superficie libre*: Los números de Reynolds del modelo y el prototipo son iguales.
 - b. *Con superficie libre*: Los números de Reynolds, Froude y (si intervienen) los números de Weber y de cavitación son iguales en el modelo y el prototipo.

Para una similitud dinámica estricta, los números de Mach, Reynolds, Froude y Weber deben ser los mismos tanto en el modelo como en el prototipo.

Esto es consecuencia de que la ley de Newton exige que para toda partícula fluida, la suma de las fuerzas de presión, gravedad y fricción han de ser igual al término de aceleración o fuerza de inercia.

$$F_p + F_g + F_f = F_i$$

Las leyes de semejanza dinámica citadas anteriormente aseguran que todas estas fuerzas están en la misma proporción y tienen direcciones equivalentes en el modelo y en el prototipo.

En resumen, la semejanza mecánica total entre el prototipo y modelo, impone la igualdad de forma, de movimiento y de proporcionalidad de fuerzas. Además de las definiciones básicas de área, volumen, velocidad, aceleración, fuerza y presión.



Capítulo 3

Factores que influyen en la *experimentación* con un túnel de viento.

Un túnel de viento o túnel aerodinámico es una herramienta experimental para estudiar los efectos del flujo de aire sobre objetos o cuerpos sólidos. Con él se simulan las condiciones experimentales por el objeto en la situación real.

En un túnel de viento, el objeto permanece estacionario mientras se fuerza el paso de aire o gas alrededor de él. El aire se sopla o aspira por medio de una turbina o ventilador a través de un conducto equipado con una ventana y otros aparatos en los que los modelos o formas geométricas se montan para el estudio. Después se utilizan varias técnicas para estudiar el flujo de aire real alrededor de la geometría y se comparan con los resultados teóricos, que también deben tener en cuenta el número de Reynolds y el número de Mach para su régimen de funcionamiento.

En su topología más elemental, un túnel de viento es una instalación formada por un conducto tubular de sección arbitraria y regular, capaz de someter al modelo bajo ensayo a un flujo fluido con determinadas propiedades, con tal de caracterizar los fenómenos producidos durante su interacción.

La experimentación en túneles de viento resulta a menudo el método más rápido, económico y preciso para la realización de estudios aerodinámicos; ofrecen capacidades de trabajo con modelos a escala en fases iniciales de desarrollo, representan enteramente la complejidad del comportamiento de un fluido real, y proporcionan grandes cantidades de información fiable que sirve de base para diferentes decisiones de diseño.

3.1 Pruebas en túneles de viento de tractocamiones

Se han hecho pruebas en túneles de viento con el fin de calcular la fuerza aerodinámica de arrastre, a continuación se describe un caso de ellos.

Se tiene un modelo a un dieciseisavo de escala de un tractocamión (18 llantas). El modelo es geoméricamente similar al prototipo, inclusive en los detalles como espejos laterales, salpicaderas, etcétera.

El modelo de camión mide 0.991 m de largo, que corresponde a una longitud de prototipo de tamaño real de 15.9 m. El modelo de camión se probará en un túnel de viento que tiene una velocidad máxima de 70 m/s.

La sección de prueba del túnel de viento tiene 1.0 m de alto y 1.2 m de ancho, lo suficientemente grande como para acomodar el modelo sin necesidad de preocuparse por la interferencia de las paredes de túnel o de efectos de bloqueo.

El aire en el túnel de viento está a la misma temperatura y presión que el aire que fluye alrededor del prototipo. Se quiere simular flujo a una velocidad de $V_p = 96.56$ km/h, igual a 26.82 m/s sobre el camión prototipo a tamaño real, véase (Fig. 3.1).

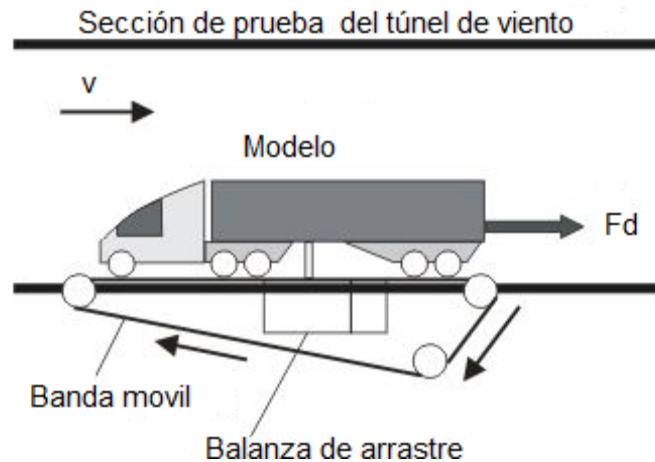


Fig. 3.1 Medición de la fuerza aerodinámica de arrastre sobre un modelo de camión en un túnel de viento equipado con una balanza de arrastre y una banda móvil a nivel del suelo.

La primera actividad que se realiza es igualar los números de Reynolds:

$$Re_m = \frac{\rho_m V_m L_m}{\mu_m} = Re_p = \frac{\rho_p V_p L_p}{\mu_p}$$

Que se puede resolver para la velocidad de túnel de viento necesaria para las pruebas de modelo V_m .

$$V_m = V_p \left(\frac{\mu_m}{\mu_p} \right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left(\frac{L_p}{L_m} \right) = (26.8 \frac{m}{s}) (1)(1) \left(\frac{16}{1} \right) = 429 \frac{m}{s}$$

Por ende, cuando se iguala el número de Reynolds entre modelo y prototipo, el túnel de viento debe correr a 429 m/s. Obviamente, aquí se tiene un problema, porque esta velocidad es más de seis veces mayor que la máxima velocidad del túnel de viento alcanzable. Más aún, incluso si se pudiera correr el túnel de viento a dicha velocidad, el flujo sería supersónico, dado que la velocidad del sonido en el aire a temperatura ambiente es cercana a 349 m/s. Mientras que el número de Mach del camión prototipo que se desplaza a través del aire es de $26.8/349 = 0.077$, la del aire del túnel de viento que corre sobre el modelo sería $429/349=1.22$ (si el aire del túnel de viento pudiera fluir así de rápido).

Por supuesto es imposible empatar el número de Reynolds del modelo con el del prototipo usando este modelo y el túnel de viento. ¿Qué se puede hacer? Existen varias opciones:

- Si se tuviera un túnel de viento más grande, se podrían hacer pruebas con un modelo más grande. Los fabricantes de automóviles usualmente prueban con modelos de autos a una escala de tres octavos y con modelos de tractocamiones y autobuses a un octavo de escala en túneles de viento muy grandes. Algunos túneles de viento son incluso lo suficientemente grandes como para probar automóviles a tamaño real (Fig. 3.2). Sin embargo, mientras más grandes sean el túnel de viento y el modelo, más costosas serán las pruebas. También se debe tener cuidado en que el modelo no sea



demasiado grande para el túnel de viento. Una regla empírica útil es que el bloqueo (la razón del área frontal del modelo al área transversal de la sección de prueba) debe ser menor que 7.5 por ciento. De otro modo, las paredes del túnel de viento afectarán contrariamente las similitudes tanto geométrica como cinemática [3].



Fig. 3.2 Túnel de viento de tamaño real de Langley (LFST, por sus siglas en inglés) es lo suficientemente grande como para probar vehículos de tamaño real.
Cortesía NASA Langley Research Center.

- Se podría usar un fluido diferente para las pruebas del modelo. Por ejemplo, los túneles de agua pueden lograr números de Reynolds más altos que los que pueden lograr túneles de viento del mismo tamaño, pero son mucho más costosos de construir y operar [3].
- Se podría presurizar el túnel de viento y/o ajustar la temperatura del aire para aumentar la capacidad del máximo número de Reynolds. Aunque estas técnicas pueden ayudar, el aumento en el número de Reynolds es limitado.
- Si todo esto falla, se podría correr el túnel de viento a diversas velocidades cercanas a la velocidad máxima, y luego extrapolar los resultados al número de Reynolds a tamaño real.

Por fortuna, se hace evidente que, para muchas pruebas en el túnel de viento, la última opción es la más viable. Aunque el coeficiente de arrastre C_d es una fuerte función del número de Reynolds a valores bajos de Re , el C_d con frecuencia se estabilizan para Re mayores de cierto valor.

En otras palabras, para flujo sobre numerosos objetos, en especial objetos “exagerados” como tractocamiones, edificios, etcétera, el flujo es independiente del número de Reynolds sobre algún valor umbral de Re (Fig. 3.3), usualmente cuando la capa límite y la estela son ambas totalmente turbulentas.

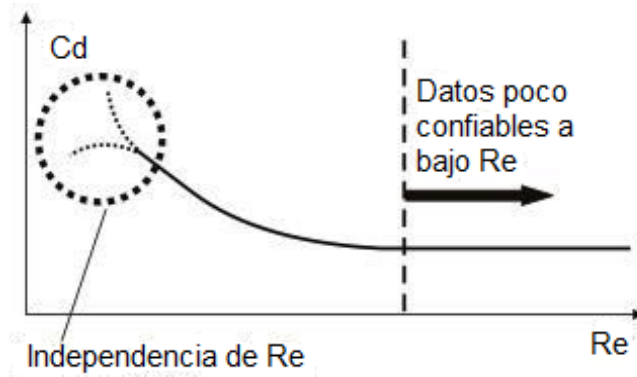


Fig. 3.3 Para numerosos objetos, el coeficiente de arrastre se estabiliza a números de Reynolds mayores de un cierto valor umbral. A esta situación afortunada se le llama independencia del número de Reynolds. Esto permite extrapolar los resultados a números de Reynolds de prototipo que están por afuera del rango de los números de Reynolds de la instalación experimental.

3.2 Diseño del experimento con modelo de tractocamión T2000 en túnel de viento

En primer lugar se igualan los números de Reynolds entre el prototipo y el modelo.

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

Considerando:

$V_{\text{prototipo}}$	60 km/h (16.66 m/s)
ρ_{aire}	0.885619 kg/m ³
$D_{\text{prototipo}}$	2.55 m (ancho del tractocamión ¹⁴)
D_{modelo}	0.0795 m
μ_{aire}	0.00001 N s /m ²

Se igualan los números de Reynolds para el modelo (escala 1:32) y prototipo:

$$Re_m = \frac{\rho_m V_m L_m}{\mu_m} = Re_p = \frac{\rho_p V_p L_p}{\mu_p}$$

Despejando la velocidad y al sustituir los valores del modelo tenemos:

$$V_m = V_p \left(\frac{\mu_m}{\mu_p} \right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left(\frac{L_p}{L_m} \right) = \left(16.66 \frac{m}{s} \right) (1)(1) \left(\frac{32}{1} \right) = 533.33 \frac{m}{s}$$

Ya que el vehículo estará estático y lo que se encontrará en movimiento será el fluido (aire), la velocidad del aire dentro del túnel de viento deberá correr a 533.33 m/s.

¹⁴ El ancho máximo para un vehículos de este tipo es de 2.6 m



Al considerar la (Fig. 3.3) se determina que para bajos números de Re el cambio en el coeficiente de arrastre es significativo, por lo que no será necesario llevar el túnel de viento a los valores antes expuestos.

3.3 Teorema de Π Buckingham

Dado un problema físico en el cual el parámetro dependiente es una función de $n - 1$ parámetros independientes podemos expresar la relación entre las variables de manera funcional como.

$$q_1 = f(q_2, q_3, \dots, q_n)$$

Donde q_1 es el parámetro dependiente y $q_2, q_3, \dots, q_n$ son los $n - 1$ parámetros independientes. Matemáticamente podemos expresar la relación funcional de manera equivalente.

$$g(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0$$

Donde g es una función desconocida, diferente de f , para el problema del arrastre del tractocamión escribimos la ecuación simbólica.

$$F = f(D, V, \mu, \rho)$$

Podemos escribir de igual manera:

$$g(F, D, V, \mu, \rho) = 0$$

El teorema de Buckingham establece que: dada una relación de la forma:

$$g(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0$$

Entre n parámetros, estos se pueden agrupar en $n - m$ parámetros adimensionales independientes, generalmente representados con el símbolo Π ;

Dicha relación tiene la forma funcional

$$G(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}) = 0$$

O bien

$$\Pi_1 = G_1(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m})$$

Usualmente (pero no necesariamente siempre), el número " m " es igual al número mínimo de dimensiones independientes necesarias para especificar las dimensiones de todos los parámetros $q_1, q_2, \dots, q_n$.

El teorema no predice la forma funcional de G y G_1 , esta relación entre parámetros los Π parámetros adimensionales independientes deberá determinarse experimentalmente.

Un parámetro Π no es independiente si se puede formar mediante el producto o el cociente de otros parámetros en el problema. Por ejemplo si



$$\Pi_5 = \frac{2\Pi_1}{\Pi_2\Pi_3}$$

O bien

$$\Pi_6 = \frac{\Pi_1^{3/4}}{\Pi_3^2}$$

Resulta evidente que ni Π_5 ni Π_6 son independientes de los demás parámetros adimensionales.

El análisis dimensional de un problema se lleva a cabo en tres etapas.

1. Se establece la lista apropiada de parámetros.
2. Los parámetros Π adimensionales se obtienen utilizando el teorema de Buckingham.
3. La relación funcional entre los parámetros Π se determina experimentalmente.

3.4 Dimensiones y unidades

Una dimensión es una medida de una cantidad física (sin valores numéricos), mientras que una unidad es una manera de asignar un número a dicha dimensión. Por ejemplo, la longitud es una dimensión que se mide en unidades como micrones (mm), pie (ft), centímetros (cm), metros (m), kilómetros (km), etcétera. Existen dimensiones primarias que son: masa, longitud, tiempo, temperatura.

Dimensiones primarias y sus unidades en el SI

Dimensión	Símbolo SI	Unidad SI
Masa	M	kg (kilogramo)
Longitud	L	m (metro)
Tiempo	t	s (segundo)

Tabla 3.1

Las dimensiones comunes en la mecánica son fuerza, masa, longitud y tiempo; ellas están relacionadas con la segunda ley de movimiento de Newton.

$$F = ma$$

La segunda ley de movimiento de Newton en forma dimensional es:

$$F = MLt^{-2}$$

Que muestra que solo tres de las dimensiones son independientes. F es la dimensión de fuerza, M la dimensión de masa, L la dimensión de longitud y t la dimensión de tiempo. Un sistema común. Empleado en análisis dimensional es el sistema MLt.

3.5 Ejemplo para el tractocamión.

La fuerza de arrastre F que actúa sobre un tractocamión, depende de la velocidad relativa V , de la longitud característica D , de la densidad del fluido en este caso aire ρ_{aire} ,



y de la viscosidad de fluido μ . Se obtiene un conjunto de parámetros adimensionales que se pueden utilizar para correlacionar los resultados de la experimentación.

Datos conocidos:

$$F_D = f(\rho, V, D, \mu)$$

Se llevan a cabo los pasos necesarios mencionados con anterioridad.

$$F_D, \rho, V, D, \mu \quad n = 5 \text{ parámetros adimensionales}$$

Seleccionamos dimensiones primarias (n) que son: masa, longitud y tiempo, (M, L, t).

$$\begin{array}{ccccc} F & V & D & \rho & \mu \\ \frac{ML}{t^2} & \frac{L}{t} & L & \frac{M}{L^3} & \frac{M}{Lt} \end{array} \quad r = 3 \text{ dimensiones primarias}$$

Se obtendrán entonces $n - m = 5 - 3 = 2$ parámetros adimensionales. Estableciendo las ecuaciones dimensionales.

$$\Pi_1 = \rho^a V^b D^c F = (ML^{-3})^a (Lt^{-1})^b (L)^c (MLt^{-2}) = M^u L^v t^0$$

Igualando los exponentes de M, L, t.

$$\left. \begin{array}{l} M: a + 1 = 0 \\ L: -3a + b + c + 1 = 0 \\ t: -b - 2 = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} a = -1 \\ c = -2 \\ b = -2 \end{array} \quad \text{Por lo tanto, } \Pi_1 = \rho^{-1} V^{-2} D^{-2} F = \frac{F_D}{\rho V^2 D^2}$$

Entonces,

$$\Pi_1 = \frac{F_D}{\rho V^2 D^2}$$

De manera semejante,

$$\Pi_2 = \rho^d V^e D^f \mu = (ML^{-3})^d (Lt^{-1})^e (L)^f (ML^{-1}t^{-1}) = M^u L^v t^0$$

$$\left. \begin{array}{l} M: d + 1 = 0 \\ L: -3d + e + f - 1 = 0 \\ t: -e - 1 = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} d = -1 \\ f = -1 \\ e = -1 \end{array} \quad \text{Por lo tanto, } \Pi_2 = \rho^{-1} V^{-1} D^{-1} \mu = \frac{\mu}{\rho V D}$$

Entonces,

$$\Pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D}$$

Verificando los resultados, al utilizar las dimensiones de F, L, t

$$\Pi_1 = \frac{F_D}{\rho V^2 D^2} = F \frac{L^4}{F L^2} \left(\frac{t}{L} \right)^2 \frac{1}{L^2} = [1]$$

Donde el símbolo [] significa “que tiene dimensiones de” y



$$\Pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D} = \frac{F L^3 \frac{1}{L}}{L^2 F L^2 \frac{1}{L}} = [1]$$

La relación funcional es $\Pi_1 = f(\Pi_2)$, o bien

$$\frac{F_D}{\rho V^2 D^2} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho V D}\right)$$

Donde D^2 es proporcional al área A , (el área que se proyecta sobre un plano normal a la dirección del flujo) y $\frac{1}{2}\rho V^2$ se le conoce como la presión dinámica de ahí la inclusión del valor $1/2$, por lo que se puede expresarse de la siguiente manera.

$$\frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} = f_3\left(\frac{\mu}{\rho V D}\right) = f_3(Re)$$

Por lo que el coeficiente de arrastre está en función del número de Reynolds.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad C_D = f(Re)$$

Como ya se conocía previamente, la forma de la función f debe determinarse experimentalmente. Solo debe modificarse el cociente $\frac{\mu}{\rho V D}$ durante los experimentos, en particular la velocidad para obtener datos confiables.

El coeficiente de arrastre es una función de la forma del cuerpo también, pero en algunos casos también depende del número de Reynolds como es nuestro caso, así también como de la rugosidad de la superficie.

3.6 Parámetros adimensionales

Número de Reynolds

En la década de 1880, Osborne Reynolds, ingeniero británico, estudio la transición entre flujo laminar y turbulento a través de un tubo. Reynolds pudo descubrir que el parámetro (que ahora lleva su nombre).

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

Constituye un criterio mediante el cual se puede determinar el estado del flujo. Donde "D" es una longitud característica descriptiva del campo de flujo. El significado físico del número de Reynolds se puede establecer más claramente si se escribe de la siguiente forma.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{\rho V D V L \frac{1}{L}}{\mu \frac{V L}{L}} = \frac{\rho V^2 L^2}{\left(\frac{\mu V}{L}\right) L^2}$$



En esta forma final, la expresión se puede interpretar como sigue:

$\rho V^2 L^2 \sim (\text{presión dinámica}) \times (\text{área}) \sim \text{fuerza de inercia}$

$\left(\frac{\mu V}{L}\right) L^2 \sim (\text{esfuerzo viscoso}) \times (\text{área}) \sim \text{fuerza viscosa}$

Entonces:

$$Re \sim \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}}$$

De este modo, el número de Reynolds se puede considerar como el cociente de las fuerzas inerciales entre las fuerzas viscosas.

Generalmente cuando el número de Reynolds se encuentra por debajo de 2,100 se sabe que el flujo es laminar, el intervalo entre 2,100 y 4,000 se considera como flujo de transición y para valores mayores de 4,000 se considera como flujo turbulento.

Número de Mach

En el año 1870, el físico austriaco Ernst Mach introdujo el parámetro:

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

Donde:

$$c = \sqrt{kRT}$$

Donde V es la velocidad del flujo y c es la velocidad local del sonido. Los análisis y los resultados experimentales han demostrado que el número de Mach constituye un parámetro fundamental para caracterizar los efectos de compresibilidad de un flujo.

Escribiéndolo de forma un poco diferente, el número de Mach resulta.

$$M = \frac{V}{c} = \frac{\sqrt{\rho V^2}}{\sqrt{\rho c^2}}$$

Que se puede interpretar como el cociente de las fuerzas inerciales entre las fuerzas debidas a la compresibilidad. Así que para tener un flujo absolutamente incompresible (recuérdese que bajo ciertas condiciones los líquidos pueden ser muy compresibles), $c = \infty$ de tal modo que $M = 0$.

Número de Froude

William Froude fue un arquitecto naval. Junto con su hijo, Robert Edmund Froude, estableció que el parámetro.



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

Resultaba significativo para flujos que presentan superficie libre. Elevando al cuadrado el número de Froude tenemos.

$$Fr^2 = \frac{V^2}{gL} = \frac{\rho V^2 L^2}{\rho g L^3}$$

Que se puede interpretar como el cociente de las fuerzas inerciales entre las fuerzas gravitatorias.

Número de Euler (coeficiente de presión)

En pruebas aerodinámicas y de otro tipo realizadas en modelos, muchas veces resulta conveniente escribir los datos relativos a la presión en forma adimensional. El cociente

$$Eu = (C_p) = \frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

Se forma de este modo donde Δp es la presión local menos la presión de la corriente libre y ρ y V son propiedades del flujo de la corriente libre. Este cociente se ha denominado número de Euler en honor a Leonhard Euler, el matemático suizo quien tanto contribuyó al trabajo analítico de mecánica de fluidos.

Coeficiente de arrastre (o de resistencia aerodinámica)

Es una cantidad adimensional que se usa para cuantificar el arrastre o resistencia de un objeto en un medio fluido como el aire o el agua.

$$Cd = \frac{\text{Fuerza de arrastre}}{\text{Fuerza de presión dinámica}} = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

3.7 Coeficiente de arrastre en vehículos

El término coeficiente de arrastre se usa de manera general en varias áreas de la vida cotidiana. Los fabricantes de automóviles intentan atraer a los consumidores cuando puntualizan los bajos coeficientes de arrastre de sus vehículos.

Cuando el efecto del camino sobre el movimiento del aire no se toma en consideración, la forma ideal de un vehículo es básicamente la lágrima, con un coeficiente de arrastre de aproximadamente 0.1 para el caso de flujo turbulento. Pero, esta forma necesita modificarse para acomodar varios componentes externos necesarios, como ruedas, espejos, ejes y manijas de puertas. Además, el vehículo debe ser lo suficientemente alto por comodidad y debe haber cierta distancia que lo aparte del camino. Más aún, un vehículo no puede ser muy largo para entrar en los garajes y espacios de estacionamiento. El control del material y los costos de fabricación exigen minimizar o eliminar cualquier volumen “muerto” que no se pueda utilizar.



El resultado es una forma que recuerda más una caja que una lágrima, y ésta fue la forma de los primeros vehículos con un coeficiente de arrastre de alrededor de 0.8 en los años de 1920. Esto no era un problema en esos días porque las velocidades eran bajas y el arrastre no se consideraba parte del diseño principal.

Los coeficientes de arrastre promedio de los automóviles cayeron a casi 0.70 en los años de 1940, a 0.55 en la década de 1970, a 0.45 en los años de 1980 y a 0.30 en los de 1990, como resultado de técnicas de fabricación mejoradas para la formación de metal y poner mayor atención a la forma del automóvil y la aerodinámica. El coeficiente de arrastre para los automóviles de carreras armados adecuadamente es casi 0.2; pero, esto se logra después de hacer la comodidad de los conductores una consideración secundaria. Cuando se nota que el límite inferior teórico de C_d es aproximadamente 0.1, y que el valor para los autos de carreras es 0.2, parece que sólo existe un pequeño espacio para mayor mejoría en el coeficiente de arrastre de los autos de pasajeros a partir del valor actual de más o menos 0.3. Para camiones y autobuses, el coeficiente de arrastre puede reducirse todavía más cuando se optimizan los contornos frontal y posterior (mediante redondeo, por ejemplo) en la medida en que sea práctico mientras se mantiene igual la longitud global del vehículo

Cuando se viaja en grupo, una manera furtiva de reducir el arrastre es drafting (algo semejante a succión), un fenómeno conocido por ciclistas y corredores de autos. El drafting implica la aproximación de un cuerpo en movimiento a otro en movimiento desde atrás y el cuerpo que se aproxima parece que se succiona hacia la región de baja presión formada en la parte posterior de otro cuerpo en movimiento. El coeficiente de arrastre de un ciclista de carreras, por ejemplo, se puede reducir de 0.9 a 0.5 por medio del drafting.

También se puede reducir el coeficiente de arrastre en un vehículo, y por lo tanto el consumo de combustible, cuando se es un conductor más consciente. Por ejemplo, la fuerza de arrastre es proporcional al cuadrado de la velocidad, por lo tanto al conducir más allá del límite de velocidad en una autopista no sólo aumenta la posibilidad de recibir una infracción o de sufrir un accidente, sino que aumenta el consumo de combustible por kilómetro, en consecuencia, el conducir a velocidad moderada es seguro y económico.

Además, algo que se extienda desde el vehículo, inclusive un brazo, aumenta el coeficiente de arrastre. Conducir con las ventanillas abiertas también aumenta el arrastre y el consumo de combustible. A la velocidad de autopista, un conductor puede ahorrar combustible en clima caliente cuando acciona el aire acondicionado en lugar de conducir con las ventanas abiertas. Para muchos vehículos de bajo arrastre, la turbulencia y el arrastre adicional que se genera al abrir las ventanas consume más combustible que el aire acondicionado; pero este no es el caso para vehículos de alto arrastre [2-3].

El coeficiente de arrastre de los vehículos varía aproximadamente 1.0 para grandes semirremolques, a 0.4 para minivans y 0.3 para automóviles de pasajeros. En general, cuanto más romo sea el vehículo, mayor es el coeficiente de arrastre. Las cubiertas reducen el coeficiente de arrastre de los aparejos tracto-remolque en aproximadamente 20 por ciento cuando se vuelve la superficie frontal más currentilínea¹⁵. Como regla

¹⁵ El de una corriente laminar permanente, fuera de la capa límite de un fluido que baña un cuerpo en que las trayectorias de las partículas fluidas no presentan cambios bruscos de dirección ni curvas cerradas.



empírica, el porcentaje de ahorro de combustible debido a la reducción de arrastre es más o menos la mitad del porcentaje de la reducción del arrastre [3].

Capítulo 4.

Fuerzas que intervienen en el desplazamiento de un vehículo

Uno de los objetivos más importantes de la resistencia aerodinámica es el ahorro y uso eficiente de la energía, así también el proteger el medio ambiente, por lo que una reducción de consumo de combustible significativa es la principal preocupación para quien está inmerso en el desarrollo de vehículos. El diseño en la carrocería del vehículo es esencial ya que es un factor importante para la reducción de la fricción del mismo ya que se ven reflejados en el bajo consumo y el rendimiento de combustible.

La resistencia aerodinámica de los vehículos pesados influye significativamente en su eficiencia energética global y por lo tanto representa un reto para su optimización. Ante la resistencia al aire, los fabricantes de camiones han estado realizando ajustes aerodinámicos a la parte delantera y cabina del vehículo. Por lo que, a través de los años la cabina presenta modificaciones para disminuir la resistencia aerodinámica.

Un estudio realizado por *Uniroyal Inc* en el año 2004 mostró que la resistencia al aire se reduce mediante un deflector en el techo de la cabina. Si el ángulo del deflector se ajusta para guiar la corriente suavemente hasta el techo y los laterales del remolque, la reducción en C_D es del 20%. Por lo tanto, a 55 mi/h la resistencia total se reduce en un 10%, con la correspondiente reducción en el gasto de combustible y/o tiempo de viaje del camión. Una reducción adicional se obtiene cuando el deflector se extiende hasta cubrir el espacio entre la cabina y el remolque [2], véase (Fig. 4.1).

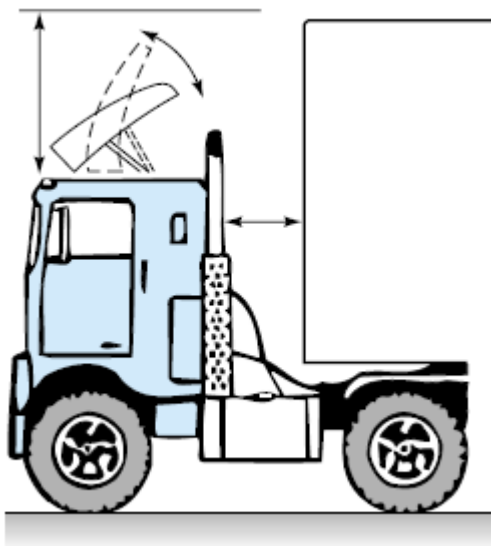


Fig. 4.1

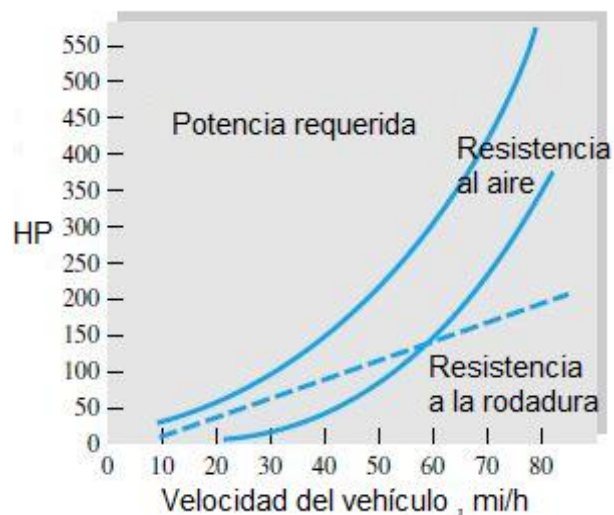


Fig. 2



Reducción del coeficiente de resistencia de un camión con remolque: (Fig. 4.1) si se añade un deflector a la cabina la resistencia del aire se reduce en un 20%; (Fig. 4.2) potencia necesaria para vencer la fuerza de resistencia. (Uniroyal Inc.)

Por otra parte para disminuir la resistencia al rodamiento del vehículo, se realizan esfuerzos tendientes al diseño de carreteras más planas y los fabricantes de llantas están desarrollando nuevas mezclas de materiales para lograr disminuir la resistencia a la rodadura (también se ha llegado a comprobar que la resistencia a la rodadura depende en gran medida a la temperatura de la llanta y no solamente de la velocidad de vehículo¹⁶), vemos en la (Fig. 2) que la resistencia a la rodadura aumenta linealmente con la velocidad, mientras que la resistencia al aire lo hace en forma cuadrática.

En lo que corresponde a la resistencia a la inercia, se están realizando esfuerzos para encontrar la mejor configuración de los componentes de la cadena cinemática, sin embargo es difícil encontrar el diseño más eficiente de engranes (Giannelli et al., 2005).

Se están desarrollando motores diésel de alta eficiencia, a través del uso de sistemas de control de las emisiones producidas por los motores. Los sistemas de propulsión híbridos tiene el potencial para duplicar la economía de combustible en los vehículos pesados a lo largo de los ciclos de conducción. Con estos sistemas la eficiencia de los vehículos podría aumentar hasta un 50% (Greszler, 2007).

La problemática a la que se enfrentan los fabricantes de vehículos, para encontrar soluciones que permitan reducir el consumo de combustible, es que los dos factores más relevantes para controlar el consumo de combustible, esto es, la velocidad y la carga a transportar, no dependen del fabricante. Por lo anterior, ha cobrado gran importancia obtener reducciones en el consumo de combustible de los vehículos pesados a través de una adecuada selección del tren motriz.

En una simulación realizada (Sanberg, 2001), se observó la distribución de la energía generada por el motor de un vehículos de servicio pesado (VSP) con un peso de 40 toneladas de peso bruto vehicular (PBV) para vencer una determinada pendiente. Para este caso el requerimiento mayor de energía lo presentó la pendiente con el 40% de la energía generada, la resistencia debida a la fricción de las llantas con el pavimento demandó el 30%, la resistencia aerodinámica presentó el 23 % y el tren motriz requirió el 7%, considerando las pérdidas en los rodamientos de la rueda, el engranaje central, caja de cambios y las unidades auxiliares del motor.

Considerando lo descrito anteriormente¹⁷, parece posible afirmar que el desarrollo y la comercialización de vehículos más eficientes reducirá de manera significativa el uso de productos derivados del petróleo, reducirá también las emisiones emitidas al medio ambiente, incluyendo al CO_2 , así como los gastos relacionados con la operación de los vehículos.

¹⁶ <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt346.pdf>

¹⁷ <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt346.pdf>



Es importante mencionar que en México no hay estudios sobre el efecto del mejoramiento en el diseño aerodinámico de los vehículos¹⁸ pesados. Tampoco la influencia que tiene esto en el consumo de combustible. Los vehículos pesados generalmente recorren grandes distancias por carretera y a velocidades mayores de 80 [km/hr] por lo cual la fuerza de arrastre es un factor importante en la resistencia que opone el vehículo a la penetración en el aire.

Las fuerzas que se oponen al desplazamiento de un vehículo y que el motor debe vencer:

- 1) *La fuerza aerodinámica* (oposición del aire al avance de un cuerpo)
- 2) *La fuerza de resistencia al rodamiento* (la fricción de las llantas sobre la carretera)
- 3) *La fuerza por pendiente* (la atracción gravitacional de la tierra)
- 4) *La fuerza de inercia* (la resistencia de una cuerpo a moverse debido a su inercia)

4.1. Fuerza aerodinámica

La resistencia que opone el aire al avance del vehículo se conoce como resistencia aerodinámica (*fuerza aerodinámica*), esta resistencia es generada por dos flujos: uno es el flujo del aire alrededor del vehículo y el otro es el flujo a través del sistema del radiador del motor y el interior del vehículo. El primer flujo es el dominante y genera una presión normal y tensiones de corte en el vehículo.

El efecto de la resistencia aerodinámica es mayor, a medida que el vehículo desarrolla mayor velocidad. La resistencia aerodinámica se expresa mediante la fórmula (Bosch, 2000):

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot (V + V_v)^2 \quad (4.1)$$

Donde:

F_z	fuerza de arrastre aerodinámica, (N)
C_d	coeficiente de arrastre, el cual es función de la forma del vehículo (adimensional) (tabla 4.1)
ρ	densidad de aire, aproximadamente 1.225 a una presión atmosférica de 1.013 bar y temperatura 288 K, (kg/m³)
V	velocidad del vehículo, (m/s)
V_v	Velocidad del viento, (m/s)
A	área frontal proyectada del vehículo en dirección del viaje, para (VSP) se tienen valores que oscilan entre 9 y 12 m², (m²)

Considerando que V , en general es mucho mayor que V_v , sólo se considera la velocidad del vehículo. Adicionalmente, los efectos del viento se toman en cuenta en los valores de

¹⁸ http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/4o_foro_de_eficiencia_energetica_en_el_transporte



C_d , que presenta valores entre 0.6 y 1.5 para vehículos de servicio pesado, (Bosch, 2000), quedando la ecuación (4.2)¹⁹.

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (4.2)$$

Tabla 4.1 Coeficientes de arrastre

Tipo de vehículo automotor	Coeficiente de arrastre
Madrinas, jaulas, bultos	0.95
Remolque doble, triple y plataformas	0.85
Vehículo normal	0.76
Con algunos aditamentos para desviar el aire	0.68
Con todos los aditamentos para desviar el aire	0.61

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 2012

4.2 Fuerza de resistencia al rodamiento

Los camiones pesados tienen un remolque para transportar la carga. Esto permite además de transportar más carga, distribuir el peso entre los ejes para minimizar el desgaste de las carreteras. La distribución de la carga en forma correcta sobre cada eje es importante en el cálculo de la resistencia al rodamiento.

La resistencia al rodamiento es el producto de la deformación que ocurre al tener contacto la llanta con la superficie de rodamiento. La fórmula para el cálculo de la resistencia al rodamiento está dada por:

$$F_z = K \cdot W \cdot g \quad (4.3)$$

Donde:

- F_z fuerza de rodamiento
- K coeficiente de resistencia al rodamiento [kg/ton], en la tabla 4.2 se muestran los valores de K para diferentes superficies
- W peso bruto vehicular
- g aceleración de la gravedad y corresponde a $9.81 \frac{m}{s^2}$

¹⁹ Método para la configuración del tren motriz de vehículos de servicio pesado con uso eficiente de combustible (Instituto Mexicano del Transporte), Publicación Técnica No. 346.



Tabla 4.2 Coeficiente de Resistencia al rodamiento en [kg/ton] (Motor Truck Engineering Handbook fourth edition, James William Fitch, 1994)

Superficie	Condición	K
Concreto	Excelente	0.0100
	Bueno	0.0150
	Malo	0.0200
Asfalto	Bueno	0.0125
	Regular	0.0175
	Malo	0.0255
Macadam	Bueno	0.0150
	Regular	0.0225
	Pobre	0.0375
Grava	Ordinaria	0.0550
	Pobre	0.0850
	Suave	0.0250
Barro	Ordinaria	0.0550
	Pobre	0.0850
	Suave	0.0250
Arena a nivel pendiente	Arenoso	0.0375
	Suave	0.0600 - 0.150
	Duna	0.1600 - 0.300

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 2012

Cuando los vehículos están cargados y circulando a bajas velocidades, se requiere de más energía para poder vencer su resistencia llegando a suponer hasta un 40% de la fuerza total resistente. Esta fuerza de resistencia es proporcional a la masa del vehículo y depende del tipo y número de neumáticos, aumentando considerablemente cuando el neumático está desinflado.

4.3 Fuerza debida a la pendiente

La carga está conectada al chasis a través del remolque. Como todas las otras masas, está afectada por la gravedad que se refleja en la pendiente de la carretera, requiriendo más potencia del motor para vencer la fuerza debida a la pendiente. Esta fuerza se determina mediante la siguiente ecuación (4.4).



$$F_3 = W \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (4.4)$$

Donde:

- F_3 fuerza por pendiente
- W peso del vehículo
- α ángulo entre la pendiente y el plano horizontal. Si el ángulo $\alpha = 0$, la fuerza por pendiente será cero.
- g es la aceleración de la gravedad y corresponde a $9.81 \frac{m}{s^2}$

Si se trata de un recorrido con pendiente hacia arriba, la inclinación tenderá a detener el vehículo y el motor tendrá que vencer esta resistencia. Al contrario, si se trata de una pendiente hacia abajo, la inclinación ocasionará que el vehículo se acelere. Esto último es muy importante en la conducción de un vehículo en terreno montañoso, ya que el motor puede alcanzar velocidades peligrosas que pueden llegar a destruirlo.

4.4 Fuerza de inercia

Si se quiere cambiar la velocidad de un vehículo, se debe vencer una fuerza que se opone a este cambio, esta fuerza se denomina fuerza de inercia y depende de la masa del cuerpo.

$$F_4 = m \cdot a \cdot i \quad (4.5)$$

$$a = \frac{v_f - v_i}{t}$$

Donde:

- F_4 fuerza por pendiente
- m es la masa del vehículo
- i es la relación de paso de la transmisión
- a es la aceleración de vehículo

Esta fuerza es muy importante en ciclo urbano ya que genera un alto nivel de consumo de combustible.

Se tienen valores altos en caso de frenadas repentinas y toda la energía producida al frenar la absorben las balatas de los frenos y las llantas, provocando desgaste.

Por otra parte la inclinación del vehículo hacia adelante provoca un cambio en el ángulo de la dirección y por lo tanto pérdida del control del vehículo.

4.5 Fuerza centrífuga



Un cuerpo que tiene movimiento curvilíneo, está sometido a una fuerza centrífuga que tiende a sacarlo de su trayectoria. Esta fuerza se puede calcular como:

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (4.6)$$

F_c es la fuerza centrífuga
 R es el radio de curvatura
 m es la masa del vehículo
 v es la velocidad

En una curva demasiado cerrada (radio pequeño) la fuerza centrífuga puede provocar una volcadura. Esta fuerza tiene una importancia mayor cuando se transporta un líquido en una pipa ya que éste se desplaza hacia los lados incrementando el nivel de riesgo.

4.6 Las fuerzas de resistencia y la potencia del motor

Cada una de las fuerzas descritas anteriormente, se oponen al movimiento del vehículo. Una parte de la potencia del motor se usará en vencerlas para poder moverse y mover la carga que lleva, por lo que es necesario conocer la fuerza total que se opone al movimiento del vehículo. Es decir, la fuerza total resultante es la suma de cada una de las fuerzas calculadas:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (4.7)$$

La potencia requerida por el motor para vencer las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo, se calcula multiplicando la intensidad de la fuerza por la velocidad del vehículo.

$$P = F \cdot v \quad (4.8)$$

P potencia del motor necesaria para vencer las fuerzas de oposición se da en (W) o (HP)
 F resultante de las fuerzas de oposición, (N)
 v velocidad del vehículo (m/s)

Un motor puede transformar su potencia en velocidad como sucede en un automóvil de carreras, o en capacidad de carga como ocurre en un camión de carga. Por ejemplo, en el primer caso puede alcanzar velocidades de 250 km/h pero con un peso de tan sólo una tonelada y en el segundo, cargar alrededor de 40 toneladas pero a velocidades no mayores a 100 km/h.



Capítulo 5

Pruebas experimentales en túnel de viento con modelo de tractocamión

Antecedentes

Las características aerodinámicas de un vehículo de servicio pesado (VSP) afectan el funcionamiento del vehículo de muchas maneras. La resistencia aerodinámica y las fuerzas laterales tienen influencia en la eficiencia del combustible, la velocidad máxima del vehículo y el rendimiento de aceleración

Algunas de las áreas que deben vencer las características aerodinámicas de un vehículo de este tipo son:

- 1) El ruido del viento
- 2) Visibilidad
- 3) Estabilidad y sensibilidad viento cruzado

Todas estas áreas se benefician de la reducción de la fricción. Esto se puede lograr con la optimización de los dispositivos de geometría en el cuerpo del (VSP) y de modificación del flujo externo. En vista de este último, una comprensión completa de la corriente de aire es un requisito previo, [8].

Un estudio realizado por Old Dominion University, E.U, sobre el flujo externo alrededor de vehículos de servicio pesado (VSP), reporta que es posible reducir el consumo de combustible de forma significativa si se mejoran el cuerpo del vehículo a través de un diseño aerodinámico, dicho estudio menciona tres elementos relevantes que generan el alto consumo de combustible, véase (Fig. 5.1).

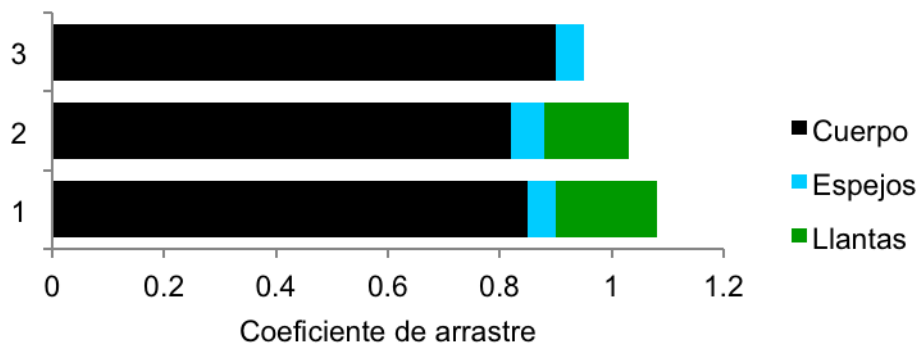




Fig. 5.1 Coeficientes de arrastre y sus componentes para cada caso en una configuración tractocamión.

Se hicieron pruebas con tres modelos de un (VSP), a escala, en el primer caso no fueron considerados los neumáticos para cuantificar el efecto en el C_d global, lo cual arrojó un 8.5% de influencia, para los dos casos siguientes fueron incluidos los neumáticos y los resultados se pueden observar en la (Fig.5.1) [8]. Con base en lo anterior se establece una necesidad de hacer mejoras en el cuerpo del (VSP) ya que esta tendrán un mayor impacto en el consumo final de combustible, durante este estudio se reportan valores de C_d para un tractocamión convencional con diferentes ángulos de deflector de aire, así como el consumo de combustible correspondiente. Durante el año 2013 se presentaron datos experimentales sobre la reducción del arrastre aerodinámico en un modelo de tractocamión (añadiendo al modelo diferentes deflectores de aire), considerando una velocidad máxima del túnel de viento de 29 m/s.

El modelo de prueba que se utilizó para dicho estudio fue a una escala de 1:30 (Mercedes - Benz 1844 ACTROS Container-Trailer). En el cual se hicieron modificaciones del ángulo del deflector de 0° , 10° , 20° y 30° .



Fig. 5.2. Túnel de viento

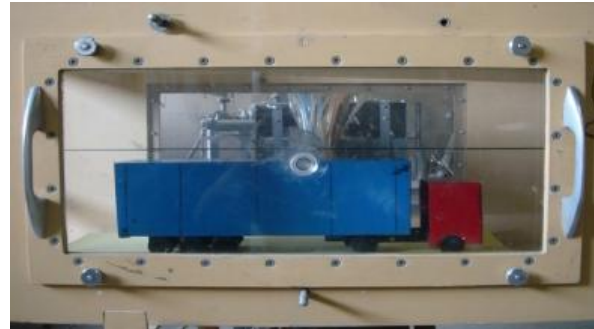


Fig. 5.3 Prueba con tractocamión

Se estima una reducción del coeficiente de arrastre para un ángulo de deflector a 10° de un 18% y con un ángulo de 20° se tiene una reducción del coeficiente de arrastre de un 21%. En el siguiente gráfico se representa el cambio porcentual en el C_d para diferentes configuraciones de deflector y ángulo de guiño²⁰.

²⁰ Improvement of Aerodynamics Characteristic of Heavy Trucks

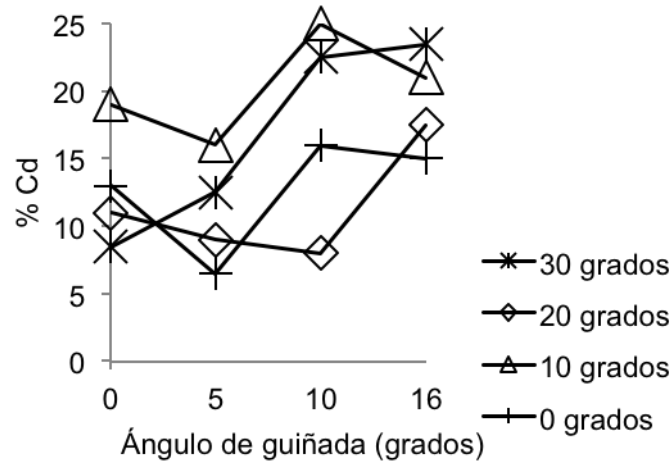


Fig. 5.4 El cambio en la fricción coeficientes con ángulo de guiñada

Durante los últimos años se ha investigado el impacto que tiene el deflector de aire en la reducción de coeficiente de arrastre y con ello estimar la reducción del consumo de combustible, pero aún no se tiene estos datos para los vehículos que actualmente circulan en nuestro país. Algunas dependencias del Gobierno Federal fomentan el uso de “accesorios”, como los mencionados en el capítulo 1. Durante este capítulo se realizaron pruebas experimentales con un modelo de tractocamión y se establece el deflector de aire más eficiente.

5.1 Valores experimentales:

– Bloqueo

Se define como la razón del área frontal del modelo al área transversal de la sección de prueba. Es decir, la relación entre el área del túnel y del modelo, para nuestro trabajo fue de 9.08, la relación deberá ser mayor a 9, de otro modo, las paredes del túnel de viento afectarían negativamente las similitudes tanto geométrica como cinemática.

Se muestra las áreas proyectadas consideradas para cada modelo.

Modelo	Área (m ²)
Tractocamión	0.0100547
Tractocamión con caja	0.0109610

El área de la sección transversal de la sección de prueba del túnel es de 0.0944190 m²

– Cálculo de la densidad del aire

Considerando:

$$T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$$

$$P_{atm} = 77.327 \text{ kPa}$$

$$R_{aire} = 290 \frac{\text{Nm}}{\text{kgK}}$$



Sustituimos en la ecuación de gas ideal:

$$P_{\text{absoluta}} = \rho_{\text{aire}} R_{\text{aire}} T_{\text{ambiente}}$$

Despejando ρ_{aire} tenemos:

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{P_{\text{absoluta}}}{R_{\text{aire}} T_{\text{ambiente}}} = \frac{77.327 \text{ kPa}}{298 \frac{\text{Nm}}{\text{kgK}} 293 \text{ K}} = 0.885619 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Al sustituir los valores correspondientes se obtiene el valor experimental de la densidad que se usará para el cálculo del coeficiente de arrastre para cada caso.

- Ecuación

La ecuación mediante la cual se obtendrá el C_d (coeficiente de arrastre) será la siguiente:

$$C_d = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

F fuerza de arrastre aerodinámica

C_d coeficiente de arrastre

ρ densidad de aire (obtenida en forma experimental)

V velocidad del aire que en promedio fue entre (0 - 14 m/s)

A área proyectada del vehículo

5.3 Pruebas con modelo de tractocamión y diferentes deflectores de aire.

Prueba (1) deflector de aire tipo concha completa (tractocamión)

En la prueba se realizaron varias mediciones preliminares, haciendo ajustes en el experimento para llegar a un coeficiente de arrastre promedio de 0.82, se pueden ver los resultados de la prueba en la (Tabla 5.1) y (Gráfica 5.1)

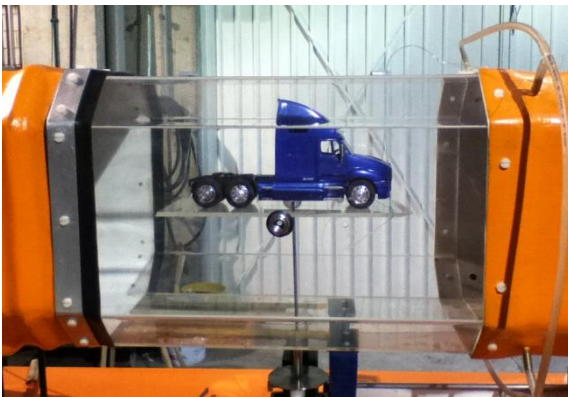


Fig.5.5 Modelo en placa de acrílico, pruebas preliminares.

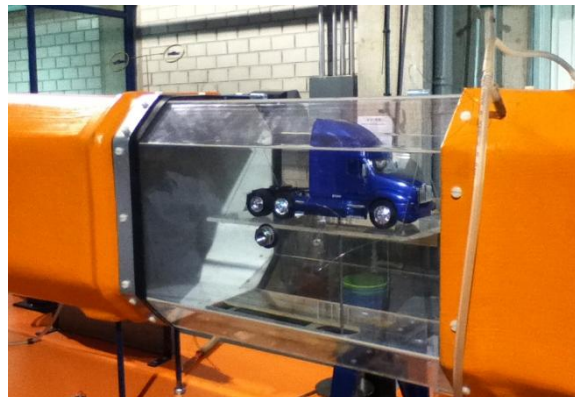


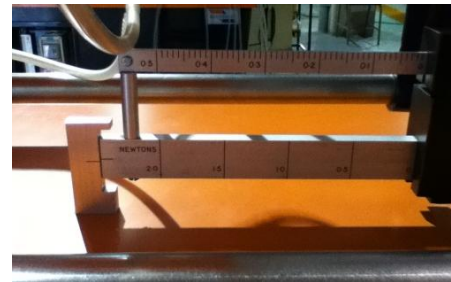
Fig.5.6 Modelo de tractocamión a 14 m/s.



Se tomaron lecturas de la fuerza de arrastre y se aumento la velocidad del aire en el túnel de viento (Imágenes 5.1-5.2).

Velocidad m/s	Velocidad km/h	Número de Reynolds Re	Fuerza Fd	Cd (-)
3	10.8	10,635	0.12	3.02
4	14.4	14,180	0.15	2.12
5	18	17,725	0.17	1.54
6	21.6	21,271	0.2	1.26
7	25.2	24,816	0.25	1.15
8	28.8	28,361	0.29	1.03
8.5	30.6	30,133	0.26	0.81
9	32.4	31,906	0.3	0.84
9.5	34.2	33,678	0.33	0.83
10	36	35,451	0.37	0.84
10.5	37.8	37,223	0.4	0.82
11	39.6	38,996	0.43	0.80
11.5	41.4	40,769	0.47	0.80
12	43.2	42,541	0.52	0.82
12.5	45	44,314	0.57	0.83
13	46.8	46,086	0.61	0.82
14	50.4	49,631	0.69	0.80

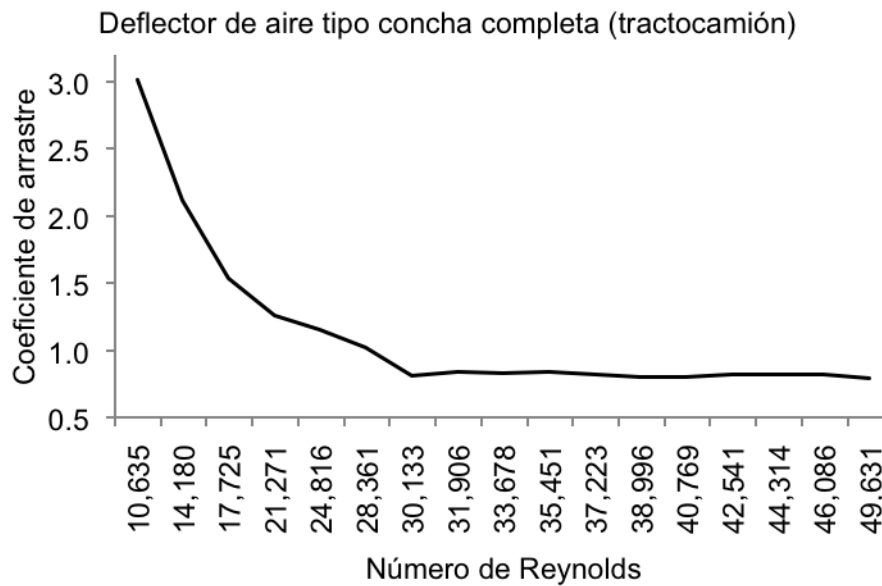
Tabla 5.1



Medición de la fuerza de arrastre
Imagen 5.1



Lecturas de la velocidad
Imagen 5.2



Gráfica 5.1

El valor del C_d experimental de 0.82 es muy cercano al reportado por el fabricante, de 0.80, se tiene un porcentaje de error relativo en el experimento de 2.5%.



$$\% \text{Error relativo} = \left| \frac{V_{PE} - V_T}{V_T} \right| \times 100 = \left| \frac{0.80 - 0.02}{0.00} \right| \times 100 = 2.5\%$$

VPE es el valor promedio del coeficiente de arrastre experimental

VT es el valor del coeficiente de arrastre teórico presentado por el fabricante

Prueba (2) deflector de aire tipo concha completa (tractocamión y semirremolque)

Para este modelo se modificó la superficie donde se coloca el modelo (placa de acrílico con mayor longitud) (Figura 5.8), los resultados se muestran en la (Gráfica 5.2).



Fig. 5.7 Modelo de tractocamión y caja, pruebas preliminares



Fig. 5.8 Modelo de tractocamión y caja 14 m/s

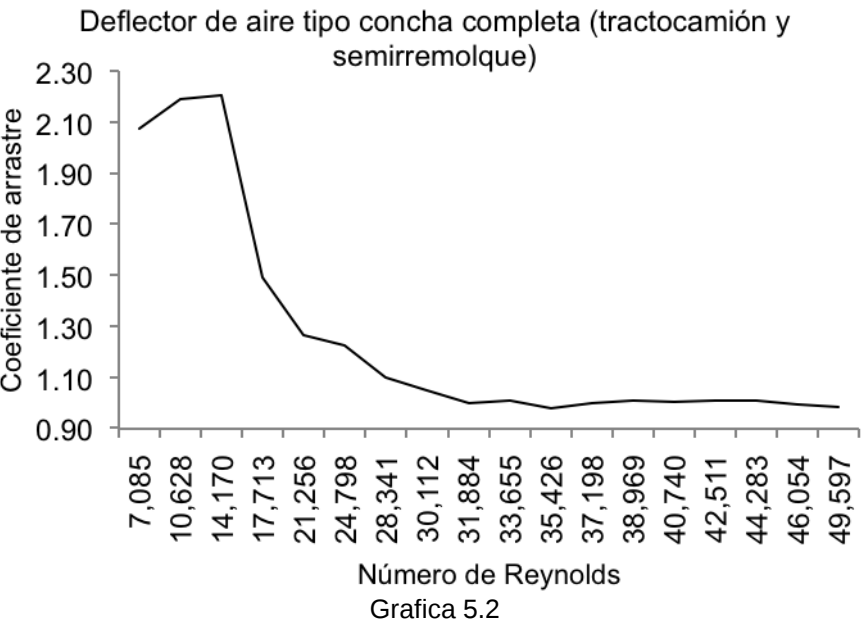
Se tomaron lecturas de la fuerza de arrastre y se calculó el coeficiente de arrastre según la (Tabla 5.2)

Velocidad m/s	Velocidad km/h	Número de Reynolds Re	Fuerza Fd	Cd (-)
2	7.2	7,085	0.04	2.08
3	10.8	10,628	0.095	2.19
4	14.4	14,170	0.17	2.21
5	18	17,713	0.18	1.50
6	21.6	21,256	0.22	1.27
7	25.2	24,798	0.29	1.23
8	28.8	28,341	0.34	1.10
8.5	30.6	30,112	0.365	1.05
9	32.4	31,884	0.39	1.00
9.5	34.2	33,655	0.44	1.01
10	36	35,426	0.47	0.98
10.5	37.8	37,198	0.53	1.00
11	39.6	38,969	0.59	1.01
11.5	41.4	40,740	0.639	1.00
12	43.2	42,511	0.7	1.01
12.5	45	44,283	0.76	1.01
13	46.8	46,054	0.81	1.00
14	50.4	49,597	0.93	0.99



Tabla 5.2

Se obtuvo un coeficiente de arrastre promedio de 1.00, siendo este uno de los menores obtenidos en la experimentación, considerando el tractocamión y semirremolque.



Prueba (3) sin deflector de aire

Para este modelo se hicieron modificaciones en la parte superior al dormitorio del tractocamión (Fig. 5.9) para eliminar el deflector de aire y medir los efectos directos en el coeficiente de arrastre, los resultados se muestran en la (Gráfica 5.3).



Fig. 5.9 Preparación del modelo de tractocamión sin deflector de aire



Fig. 5.10 Prueba de modelo tractocamión sin deflector de aire a una velocidad de 14 m/s

Se tomaron lecturas de la fuerza de arrastre y se obtuvieron valores del coeficiente de arrastre según la (Tabla 5.3)

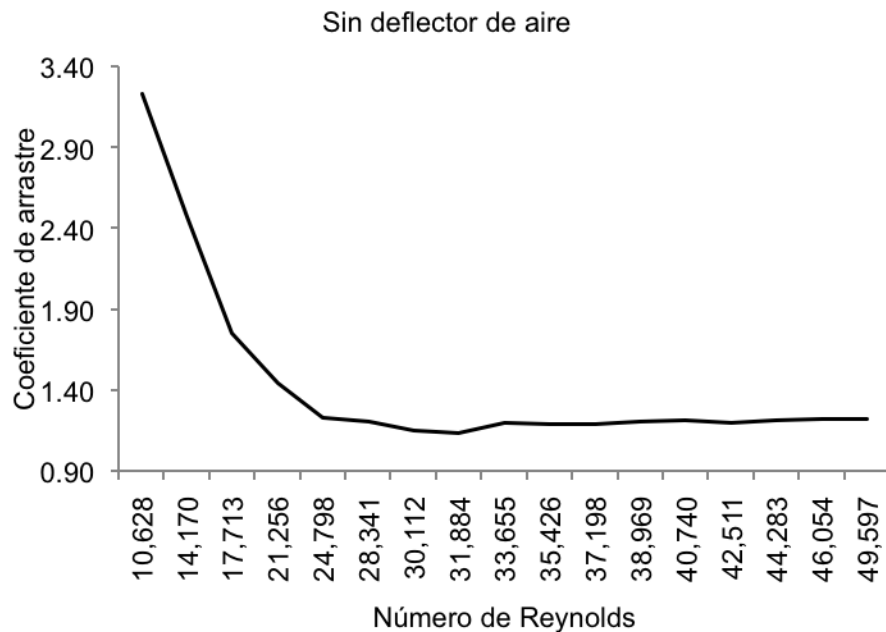
Velocidad	Velocidad	Número de	Fuerza	Cd
-----------	-----------	-----------	--------	----



m/s	km/h	Reynolds Re	Fd	
3	10.8	10,628	0.14	3.23
4	14.4	14,170	0.19	2.47
5	18	17,713	0.21	1.75
6	21.6	21,256	0.25	1.44
7	25.2	24,798	0.29	1.23
8	28.8	28,341	0.37	1.20
8.5	30.6	30,112	0.4	1.15
9	32.4	31,884	0.44	1.13
9.5	34.2	33,655	0.52	1.20
10	36	35,426	0.57	1.18
10.5	37.8	37,198	0.63	1.19
11	39.6	38,969	0.7	1.20
11.5	41.4	40,740	0.77	1.21
12	43.2	42,511	0.83	1.20
12.5	45	44,283	0.91	1.21
13	46.8	46,054	0.99	1.22
14	50.4	49,597	1.15	1.22

Tabla 5.3

Como se ha mencionado hay notables beneficios de la implementación del deflector de aire en vehículos pesados, pero aún circulan en nuestro país vehículos de gran tonelaje sin esta implementación.



Grafica 5.3

El arreglo de la prueba tres proporciona el mayor valor de coeficiente de arrastre de todos los modelos que fueron probados con un valor promedio de 1.25.



Prueba (4) deflector de aire a 31°

Para este modelo se construyó el deflector de aire a 31° para después ser colocado en el modelo, tomar lectura de la fuerza aerodinámica y con ello ver efectos en el coeficiente de arrastre, los resultados se pueden observar en la (Tabla 5.4) y la (Gráfica 5.4).



Fig. 5.11 Pruebas preliminares en tunel de viento con modelo de tractocamión. Con deflector a 31 grados.



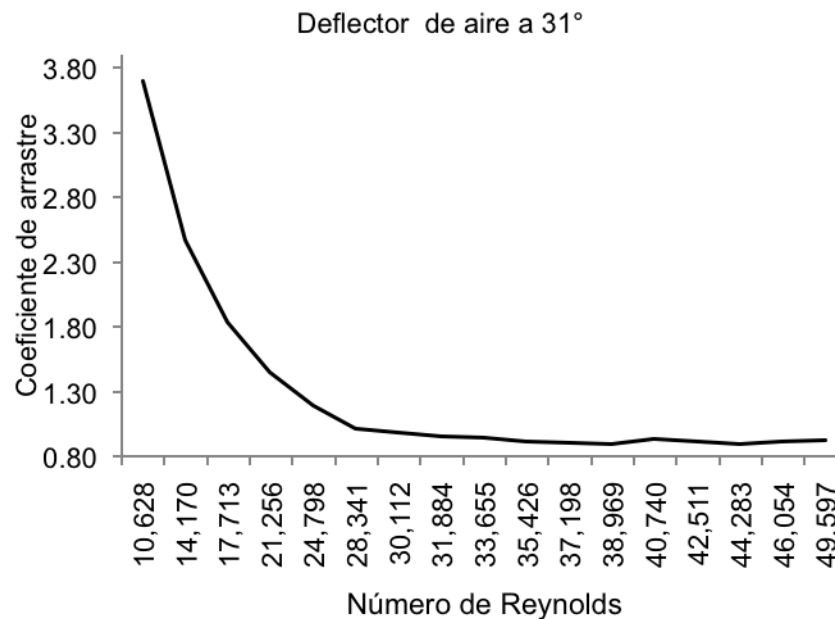
Fig. 5.12 Prueba de modelo tractocamión a 14 m/s, después de esta velocidad existe una vibración considerable que impide tomar lecturas de la fuerza aerodinámica.

Se realizaron mediciones de la fuerza de arrastre y se obtuvieron valores del coeficiente de arrastre según la (Tabla 5.4)

Velocidad m/s	Velocidad km/h	Número de Reynolds Re	Fuerza Fd	Cd (-)
3	10.8	10,628	0.16	3.69
4	14.4	14,170	0.19	2.47
5	18	17,713	0.22	1.83
6	21.6	21,256	0.25	1.44
7	25.2	24,798	0.28	1.19
8	28.8	28,341	0.31	1.01
8.5	30.6	30,112	0.34	0.98
9	32.4	31,884	0.37	0.95
9.5	34.2	33,655	0.41	0.94
10	36	35,426	0.44	0.91
10.5	37.8	37,198	0.48	0.90
11	39.6	38,969	0.52	0.89
11.5	41.4	40,740	0.59	0.93
12	43.2	42,511	0.63	0.91
12.5	45	44,283	0.67	0.89
13	46.8	46,054	0.74	0.91
14	50.4	49,597	0.87	0.92

Tabla 5.4

Se observa que al principio de las lecturas se obtienen valores de Cd grandes, pero con el paso de las lecturas se llega a obtener un valor estable.



Gráfica 5.4

Dicho modelo proporcionó un coeficiente de arrastre promedio de 0.915, este resultado fue el menor obtenido considerando el tractocamión y semirremolque.

Prueba (5) deflector de aire a 41°

Para este modelo se construyó el deflector de aire a 41° para después ser colocado en el modelo y medir los efectos en el coeficiente de arrastre, los resultados se pueden observar en la (Tabla 5.4) y la (Gráfica 5.4).

El propósito de tener el deflector a 41° era ver los efectos ocasionados al colocar el deflector a la misma altura del semirremolque, se obtuvieron resultados favorables de Cd.



Fig.5.13 Modelo de tractocamión con deflector a 41°.



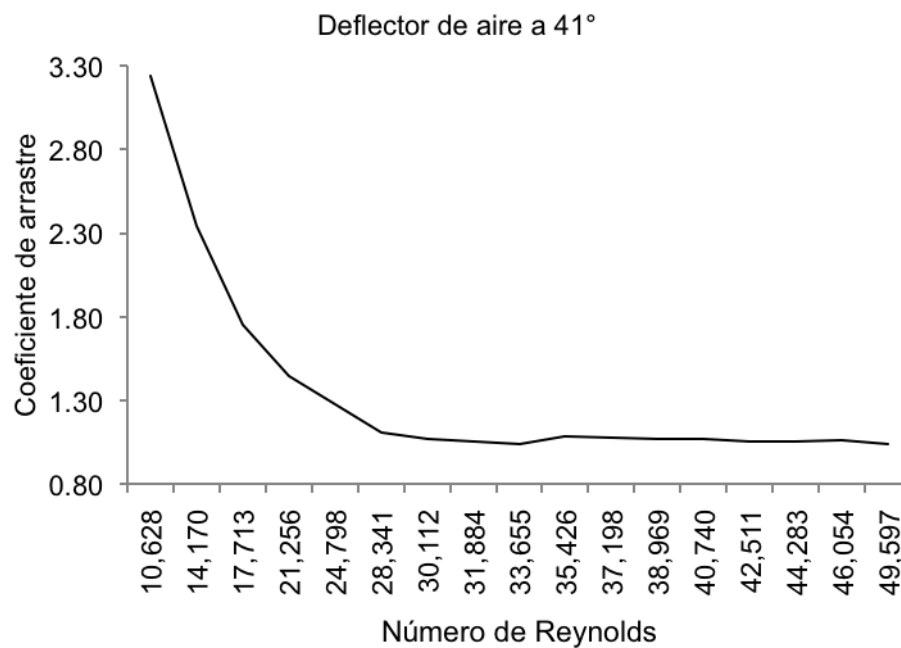
Fig. 5.14 Prueba de modelo tractocamión a 14 m/s



Se tomaron lecturas de la fuerza de arrastre y se obtuvieron valores del coeficiente de arrastre según la (Tabla 5.5)

Velocidad m/s	Velocidad km/h	Número de Reynolds Re	Fuerza Fd	Cd (-)
3	10.8	10,628	0.14	3.23
4	14.4	14,170	0.18	2.34
5	18	17,713	0.21	1.75
6	21.6	21,256	0.25	1.44
7	25.2	24,798	0.3	1.27
8	28.8	28,341	0.34	1.10
8.5	30.6	30,112	0.37	1.06
9	32.4	31,884	0.41	1.05
9.5	34.2	33,655	0.45	1.04
10	36	35,426	0.52	1.08
10.5	37.8	37,198	0.57	1.07
11	39.6	38,969	0.62	1.06
11.5	41.4	40,740	0.68	1.07
12	43.2	42,511	0.73	1.05
12.5	45	44,283	0.79	1.05
13	46.8	46,054	0.86	1.06
14	50.4	49,597	0.975	1.03

Tabla 5.5



Gráfica 5.5



Se obtuvo un coeficiente de arrastre promedio de 1.07. lo cual fue mayor al ocupar un ángulo de 31° , esto por la zona turbulenta que se forma en la parte superior del semirremolque al aumentar la velocidad del vehículo.

Prueba (6) deflector de aire de media concha

Para esta prueba se hicieron modificaciones al deflector de aire de la (prueba 2) recorriendo el mismo hasta la parte superior del dormitorio. Y fue hecho porque este tipo de configuración se ha hecho muy común en vehículos de este tipo, se pretende ver los beneficios de este tipo de configuración de deflector de aire.



Fig. 5.15 Modelo de tractocamión con deflector de aire modificado tipo (media concha).



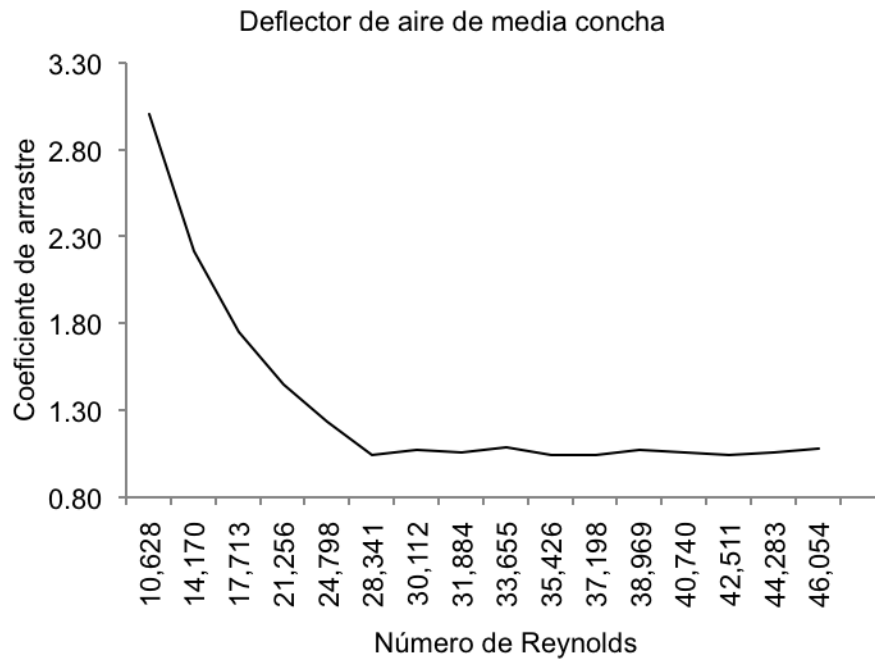
Fig. 5.16 Prueba de modelo tractocamión a 14 m/s

Se realizaron mediciones de la fuerza de arrastre aerodinamica y se obtuvieron valores del coeficiente de arrastre según la (Tabla 5.6) y (Gráfica 5.6)

Velocidad m/s	Velocidad km/h	Número de Reynolds Re	Fuerza Fd	Cd (-)
3	10.8	10,628	0.13	3.00
4	14.4	14,170	0.17	2.21
5	18	17,713	0.21	1.75
6	21.6	21,256	0.25	1.44
7	25.2	24,798	0.29	1.23
8	28.8	28,341	0.32	1.04
8.5	30.6	30,112	0.37	1.06
9	32.4	31,884	0.41	1.05
9.5	34.2	33,655	0.47	1.08
10	36	35,426	0.5	1.04
10.5	37.8	37,198	0.55	1.04
11	39.6	38,969	0.62	1.06
11.5	41.4	40,740	0.67	1.05
12	43.2	42,511	0.72	1.04
12.5	45	44,283	0.79	1.05
13	46.8	46,054	0.877	1.08



Tabla 5.6



Gráfica 5.6

Se obtuvo un coeficiente de arrastre promedio de 1.05

5.4 Pruebas de visualización en el túnel de viento

Dado que el aire que circula por el túnel es transparente, es difícil observar su movimiento. Por lo que se han desarrollado diferentes métodos de visualización de flujo, tanto cuantitativos como cualitativos. En caso de flujos estacionarios, las líneas de flujo se logran visualizar en el túnel de viento con ayuda de niebla, humo o hilos. De esta forma se muestra claramente un campo de flujo momentáneo, así como zonas de flujo problemáticas como, p. ej., desprendimientos de flujo²¹.

Prueba de visualización de flujo en túnel de agua, con modelo a escala de tractocamión por el Instituto de Tecnología de California (1991), (Fig. 5.17).

²¹Túnel de viento para visualización de líneas de flujo, (GUNT HAMBURG).



Fig. 5.17 Visualización de flujo de un modelo de tractocamión en un túnel de agua²²

Las pruebas se realizaron a una velocidad del fluido de 2.49 m/s permitiendo determinar áreas de mayor presión en el modelo en la parte frontal del vehículo.

Se concluyó que la producción del arrastre en la parte frontal del vehículo pesado es debido a la forma geométrica del vehículo, la cual tiene una gran influencia sobre la distribución de las presiones; sin embargo, el arrastre por interferencia también podría ser significativo debido a que el flujo en la parte delantera del vehículo, tiene que pasar por varios obstáculos como los limpia parabrisas, los espejos retrovisores y otros.

Es importante realizar una prueba experimental de visualización del flujo del aire sobre el modelo, para observar la reacción de éste a corrientes de todas clases, en este caso del aire en la superficie del modelo.

Para este caso se realizaron pruebas de visualización en un intervalo de velocidad entre 1-4 m/s, se usó humo el cual ayudo a hacer visibles las líneas de flujo, separación de flujo y turbulencias, los resultados se muestran a continuación.

Prueba de visualización (1) deflector de aire de concha completa

²² Applications of DDPIV to studies associated with Road vehicles



Fig. 5.18 Deflector de aire tipo concha completa a una velocidad de 1 m/s



Fig. 5.19 Deflector de aire tipo concha completa una velocidad de 3 m/s

Se observa que el deflector de aire permite una mejor penetración del vehículo en el fluido, tanto a bajas velocidades como a velocidades altas, reconociendo que a velocidades altas se obtiene un mejor resultado.

También notamos que la zona de mayor arrastre es aquella donde las líneas de corriente²³ están más separadas entre sí (Fig. 5.18), y la zona de mayor velocidad es aquella donde las líneas de corriente están más juntas entre sí (Fig. 5.19).



Fig. 5.20 Deflector de aire tipo concha completa a una velocidad de 2 m/s



Fig. 5.21 Deflector de aire tipo concha completa a una velocidad de 4 m/s

Se identifica en las (Figuras 5.18 y 5.20), que la forma del patrón de flujos depende del desarrollo de la capa límite y su desprendimiento; una vez que se desprende la capa límite, se observan flujos recirculantes en el espacio cabina-trailer generando arrastre.

Prueba de visualización (2) sin deflector de aire

Durante esta prueba se suprimió el deflector y como se ha mencionado este modelo fue el que generó mayor arrastre. A través de la visualización se observa las zonas más problemáticas como la zona tractocamión y el semirremolque (Fig. 5.22).

²³ Es la línea continua que se traza en un fluido que tiene la dirección del vector de velocidad en cada punto de su desplazamiento, donde la partícula se mueve de manera tangencial a esta línea.



Fig. 5.22 Sin deflector de aire a una velocidad de 1 m/s



Fig. 5.23 Modelo tractocamión sin deflector a una velocidad de 4 m/s

Se observa que el fluido choca con la caja constantemente (Fig. 5.23) y se generan vórtices que provocan mayor demanda del motor para desplazar el vehículo y por lo tanto mayor demanda de combustible, este es al modelo al que se tienen que implementar mejoras para una mejor utilización de combustible por medio de deflectores de aire.

Prueba de visualización (3) deflector de aire a 31°



Fig. 5.24 Deflector de aire a 31° a una velocidad de 2 m/s



Fig. 5.25 Deflector de aire a 31° a una velocidad de 4 m/s

Se observa que el deflector proporciona una mejor penetración en el fluido (Fig. 5.25), pero se generan vórtices en la parte inicial del deflector de aire y en la zona de tractocamión y el semirremolque a bajas velocidades (Fig. 5.24), una forma de eliminar este último efecto es colocar en esta zona un (*estabilizador de vórtices*) como se mencionó en el capítulo 1 (Fig. 1.6). Este elemento reduce el espacio de esta zona que provoca arrastre.

Prueba de visualización (4) deflector de aire a 41°



Fig. 5.26 Deflector de aire a 41° a 3 m/s

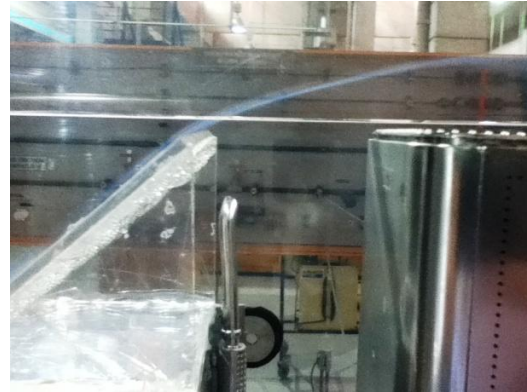


Fig. 5.27 Deflector de aire a 41° a 4 m/s

El deflector de aire a 41° permite llevar al fluido arriba del semirremolque reduciendo el arrastre en el área entre el tractocamión y el semirremolque (Fig. 5.6).

Prueba de visualización (5) deflector de aire tipo media concha

Se observa en esta prueba que a bajas velocidades existe un área de estancamiento entre el tractocamión y el semirremolque.



Fig. 5.28 Deflector de aire tipo media concha a 2 m/s.



Fig. 5.29 Deflector de aire tipo media concha a 4 m/s.

A medida que la velocidad del aire aumenta, el beneficio del deflector de aire crece, por lo que el deflector de aire permite a la corriente de aire desplazarse adecuadamente (Fig. 5.29).

De igual modo se observa que el deflector a medida que aumenta la velocidad del viento este ayuda a la mejor inclusión del vehículo en el fluido, pero a bajas velocidad esta mejora aerodinámica no ayuda, la CONUEE²⁴ recomienda a operadores de vehículos pesados conducir a una velocidad máxima de 90 km/h, de otro modo se pierde el beneficio del accesorio.

5.5 Consumo de combustible

²⁴ Eficiencia energética para el operador profesional, accesorios del vehículo (CONUEE).



En el año 2014 la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE²⁵) realizó el 4º foro de eficiencia energética²⁶, enfocado al tema de la aerodinámica de los vehículos pesados de autotransporte. Asistieron transportistas, fabricantes de equipos y dispositivos, funcionarios públicos, académicos e investigadores.

Entre los puntos de interés, se comentó que el 53% de la energía final de un tractocamión es utilizada para vencer la resistencia del viento que se opone a su movimiento, así como que la aerodinámica es un fenómeno presente en carreteras y autopistas cuando la velocidad supera los 20 kilómetros por hora.

Entre los dispositivos que han mejorado la aerodinámica los últimos años, se encuentran los deflectores en la cabina y los de “cola”, faldones laterales de las cajas, cubiertas para tanques de combustible y perfiles redondeados de los vehículos.

Entre las conclusiones del foro se destacó que el diseño aerodinámico de los vehículos disminuye, de manera sobresaliente, el consumo de combustible y la generación de emisiones contaminantes, así como que la mayor parte de los fabricantes de vehículos pesados han logrado avances tecnológicos para mejorar la aerodinámica, entre las empresas que asistieron son:

- Navistar-International
- ATDynamics
- Daimler-Freightliner
- Kenworth-Paccar
- Volvo
- Hyundai y la empresa Andrómeda

Los datos e imágenes que se muestran a continuación fueron proporcionados por ATDynamics²⁷ se mostraron resultados de ahorro de combustible con accesorios aerodinámicos.

Prueba en túnel de viento por (Auto Research Center) del estado de California con modelo de tractocamión 1:8.



Fig. 5.30 Paneles de extensión



Fig. 5.31 Prueba con deflector de aire

Con los elementos que incluye el vehículo se estima un Ahorro de combustible del 6.17%.

²⁵ <http://www.conuee.gob.mx/wb/>

²⁶ http://www.conuee.gob.mx/wb/Conuee/realiza_conuee_el_4_foro_de_eficiencia_energetica_

²⁷ www.ATDynamics.com



National Research Council Canada presentó los siguientes datos sobre las pruebas experimentales en túnel de viento con modelos de tractocamiones así como el impacto en el consumo de combustible.



Fig. 5.32 Deflector a 20°



Fig. 5.33 Paneles de extensión biselados 15°



Fig. 5.34 Estabilizador de vórtices

Se probó un modelo a escala 1:10 de un tractocamión en un túnel de viento de área sección transversal de 6 m². Se estima un porcentaje de *reducción de combustible* con las modificaciones mostradas en las (Figs. 5.32-5.34) del 5.9 % y una reducción del coeficiente de arrastre del 15%.

La Universidad de Clarkson realizó pruebas en un túnel de viento con modelo de tractocamión (Fig. 5.35) se estima un reducción de combustible del 5.7%

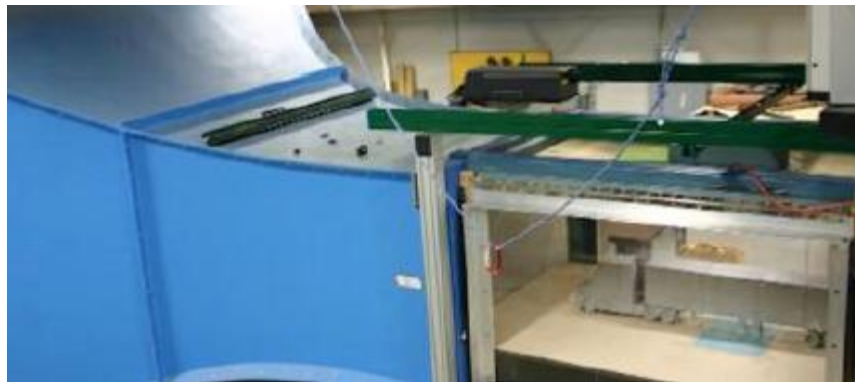


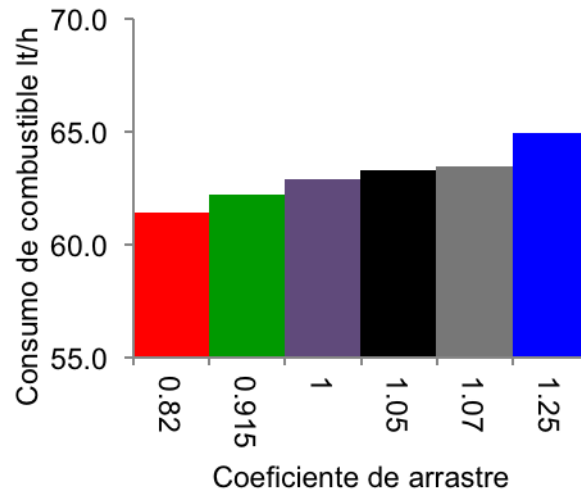
Fig. 5.35 Modelo de tractocamión en túnel de viento

El potencial de ahorro de combustible para el caso de vehículos pesados tiene un orden según los datos mostrados de entre 5.7 a 6.17%, lo cual servirá como base para poder definir los resultados obtenidos.

A continuación se muestran los resultados del consumo de combustible para cada modelo de tractocamión, con las diferentes modificaciones de deflector de aire, en la (Tabla 7) y (Gráfica 7), se muestra detalle del cálculo en el anexo (2) *consumo de combustible*.

Modelo	Cd (promedio)	Consumo (lt/h)
Deflector concha completa	0.82	61.42
Deflector a 31°	0.915	62.19
Deflector concha completa	1	62.89
Deflector media concha	1.05	63.3
Deflector a 41°	1.07	63.46
Sin deflector	1.25	64.93

Tabla 7

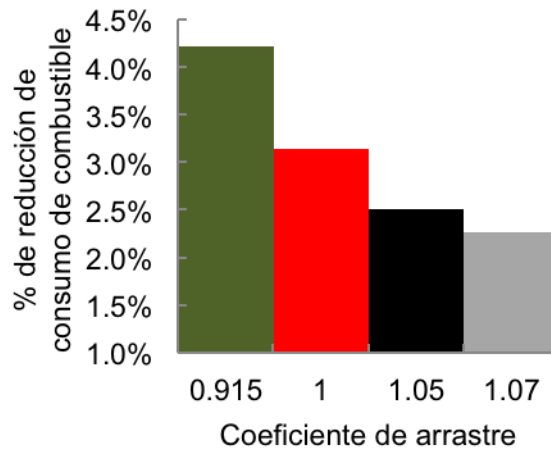


Grafica 7

Se muestran a continuación los porcentajes de reducción de consumo de combustible por tipo de deflector (Tabla 8).

Tipo de deflector	% Reducción de consumo
Deflector a 31°	4.22
Deflector concha completa	3.14
Deflector a 41°	2.26
deflector media concha	2.50

Tabla 8. Porcentaje de reducción de consumo de combustible por tipo de deflector



Gráfica 7. Porcentaje de reducción de consumo de combustible.

Se tiene que para el deflector²⁸ colocado a 31° junto con el deflector tipo concha completa ofrecen la mayor reducción, aunque es importante decir que todos los deflectores proporcionan una reducción del consumo de combustible por lo que es importante su implementación en ellos (VSP) que circulan en nuestro país

²⁸ Dispositivo que tiene como fin cambiar o desviar la dirección de la corriente de un fluido.



.Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

- 1) El tipo deflector impacta el coeficiente de arrastre, así como también consumo de combustible (Gráfico. 6.1).
- 2) La forma y posición del deflector de aire influye en las líneas de corriente, en el coeficiente de arrastre y en el consumo de combustible (Fig. 6.1 y Fig. 6.2).



Fig. 6.1 deflector de aire



Fig. 6.2 deflector de aire

- 3) La altura de la caja (semirremolque) influye en el comportamiento aerodinámico del vehículo (Fig. 6.3 y 6.4).



Fig. 6.3 vehículo de reparto



Fig. 6.4 vehículo de reparto

- 4) A velocidades de operación de carretera el coeficiente de arrastre afecta de manera importante el consumo de combustible.
- 5) Es importante la selección adecuada del tipo de deflector a usar en el semirremolque. En el caso de pipas o autotanques puede tener un efecto contrario (Fig. 6.5).



Fig. 6.5 pipas

- 6) En los vehículos de bajas velocidades se recomienda el uso del deflector de aire, ya que éste trae beneficios en el uso eficiente de la energía (Fig. 6.6).



Fig. 6.6 Deflector de aire en vehículo de reparto

- 7) Se recomienda realizar pruebas adicionales con diferentes tipos de semirremolques como cama baja (Fig. 6.7), pipas (Fig. 6.8), madrinas (Fig. 6.9).



Fig. 6.7 cama baja



Fig. 6.8 pipas



Fig. 6.9 madrina

- 8) Se recomienda realizar pruebas en modelos de tractocamión incluyendo los accesorios que fueron mencionados en el capítulo 1, para determinar los beneficios en la reducción de coeficiente de arrastre los cuales son:
- a) Cola de barco
 - b) Camisas
 - c) Ojiva (nose cone)
 - d) Estabilizador de vórtices
 - e) Cubierta tipo bogie



Coeficientes de arrastre

Se muestran todos los resultados obtenidos para el coeficiente de arrastre durante la experimentación con 6 modelos

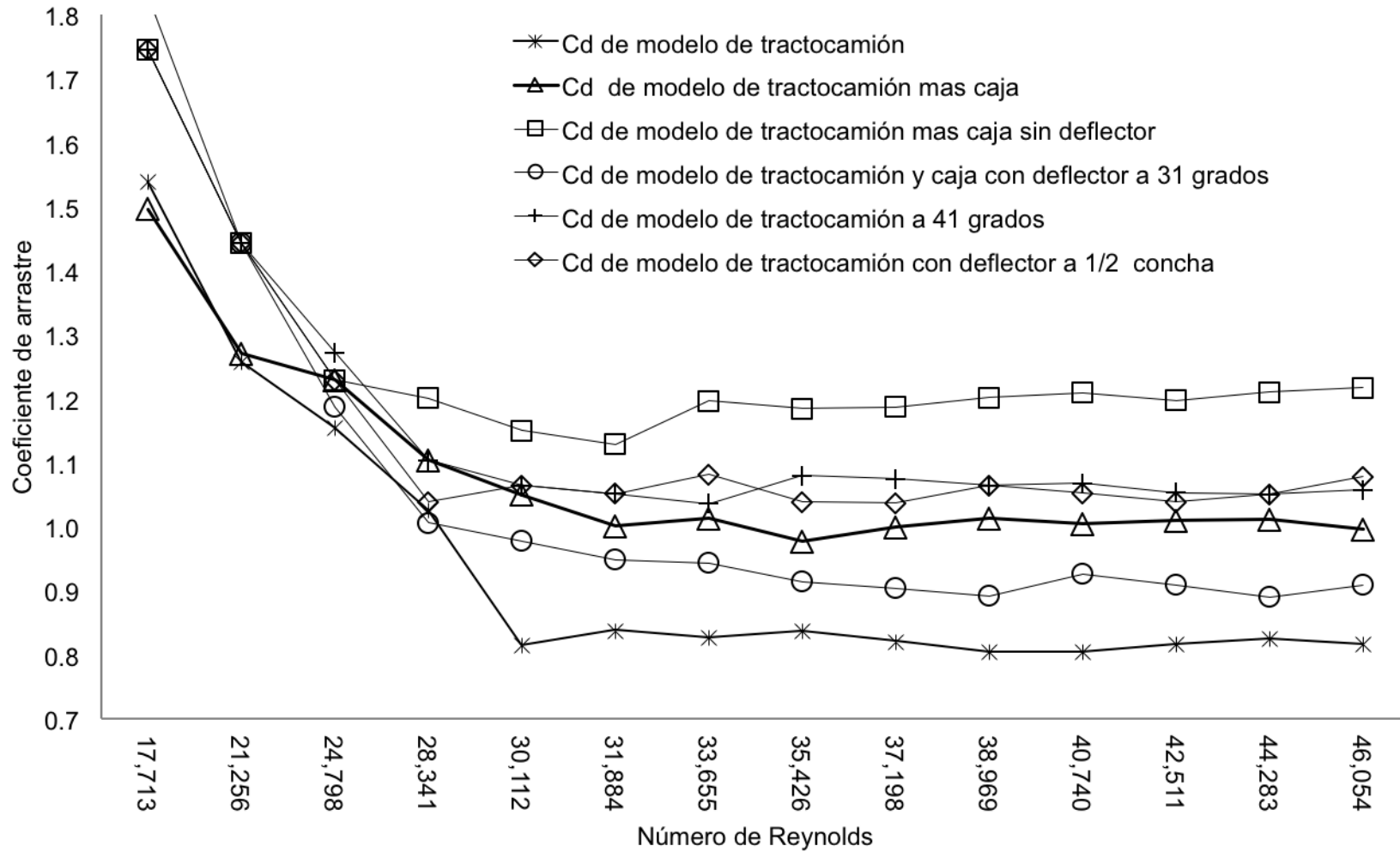
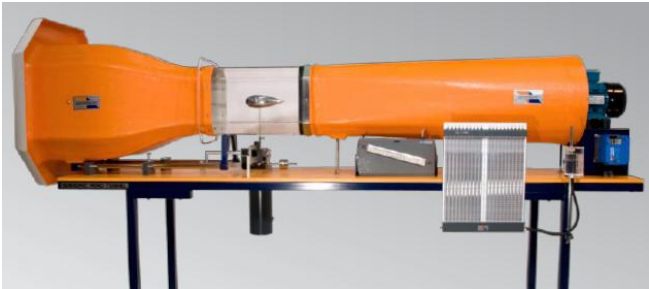


Fig. 6.1 Coeficiente de arrastre de todos los modelos de tractocamión con sus respectivas modificaciones de deflector.



Anexo (1)
Túnel de viento armfield-C2

Dicho instrumento permite la optimización componente aerodinámico, las comparaciones de equipo y el examen de los efectos del viento.



Túnel de viento subsónico²⁹

 Balanza instrumentada para medir el arrastre	Características del instrumento Fuerza de arrastre: 2.5 N Fuerza de arrastre: 7.0 N Sensibilidad: ± 0.01 N
 Manómetro inclinado (medición de la velocidad en m/s)	Velocidad máxima: 26 m/s
 Sección octagonal de prueba	Sección de trabajo: 304 mm de ancho x 304 mm de alto x 457 mm largo (sección transversal octagonal)

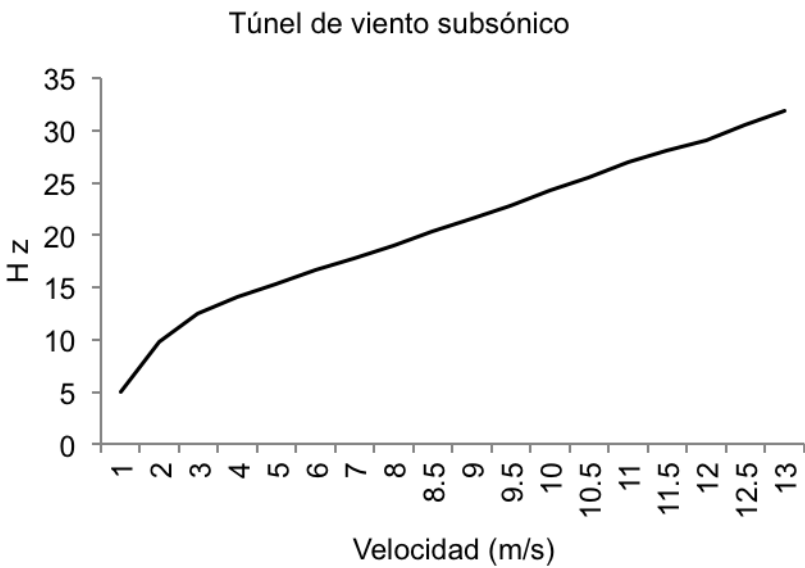
²⁹ velocidad menor a la velocidad del sonido, menos a 340 m/s
Kozvy Osorio Montes



Caracterización del túnel subsónico

Velocidad (m/s)	Hz
1	5
2	9.8
3	12.5
4	14.1
5	15.3
6	16.7
7	17.8
8	19
8.5	20.3
9	21.5
9.5	22.8
10	24.2
10.5	25.5
11	26.9
11.5	28
12	29
12.5	30.5
13	31.9

Tabla 1



Gráfica 1

Potencia del motor 15 kW



Anexo (2)

Calculo del consumo de combustible

Se obtendrá el cálculo del consumo de combustible para un valor de C_d considerando el primer valor obtenido que fue de 0.82, de manera análoga se obtienen los consumos para los diferentes coeficientes de arrastre.

Se obtienen los valores de las resistencias que se oponen al movimiento del vehículo, las cuales son 4.

Cálculo de la fuerza debida a la resistencia aerodinámica:

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot (0.82) \cdot \left(0.885619 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot (10 \text{ m}^2) \cdot \left(19.44 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 1,362 \text{ [N]}$$

Donde:

- F_1 fuerza de arrastre aerodinámica, (N)
- C_d coeficiente de arrastre (-).
- ρ densidad de aire, 0.885619 kg/m^3
- V velocidad del vehículo, (m/s)
- A área frontal proyectada del vehículo en dirección del viaje, para (VSP) se tienen valores que oscilan entre 9 y 12 m^2

Cálculo de la resistencia al rodamiento:

$$F_2 = K \cdot W \cdot g = \left(6 \frac{\text{kg}}{\text{ton}}\right) \cdot (45 \text{ ton}) \cdot \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 2,648 \text{ [N]}$$

Donde:

- F_2 fuerza de rodamiento
- K coeficiente de resistencia al rodamiento (kg/ton)
- W peso bruto vehicular
- g aceleración de la gravedad y corresponde a $9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Cálculo de la resistencia por pendiente:

$$F_3 = W \cdot g \cdot \sin \alpha = (45,000 \text{ kg}) \cdot \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot \sin(1^\circ) = 7,704 \text{ [N]}$$

Donde:

- F_3 fuerza por pendiente
- W peso del vehículo
- α ángulo entre la pendiente y el plano horizontal. Si el ángulo $\alpha = 0$, la fuerza por pendiente será cero.
- g es la aceleración de la gravedad y corresponde a $9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$



Cálculo de la resistencia por inercia:

$$F_4 = m \cdot a \cdot i$$

$$F_4 = m \cdot \left(\frac{v_f - v_i}{t} \right) i = 45,000 \text{ kg} \cdot \left(\frac{22.22 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 19.44 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{240 \text{ s}} \right) \cdot 1.5 = 781 \text{ [N]}$$

Donde:

- F_4 fuerza por pendiente
- m es la masa del vehículo
- i es la relación de paso de la transmisión
- a es la aceleración de vehículo

Se tiene ahora que la fuerza teórica será, la suma de las cuatro fuerzas calculadas con anterioridad que tiene como ecuación la siguiente expresión:

$$F_{\text{resultante}} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$$

Considerando un factor de seguridad (por perdidas)

$$F_{ss} = 10\%$$

Se tiene la fuerza resultante total

$$F_{\text{resultante total}} = F_{ss} \cdot F_{\text{resultante}}$$

Para calcular la potencia por cada una de las resistencias solo se multiplica por la velocidad del vehículo (19.44 m/s).

$$P = F_1 \cdot V + F_2 \cdot V + F_3 \cdot V + F_4 \cdot V = 242,987 \text{ [Joule/s]}$$

Finalmente la potencia requerida estará dada por la siguiente expresión:

$$P_{\text{total}} = F_{\text{resultante total}} \cdot V = 267,286.31 \text{ [Joule/s]}$$

Convertimos el valor de Joule/s a HP, y tenemos el siguiente resultado.

$$267,286.31 \text{ [Joule/s]} \cdot \left(\frac{1}{747} \right) = 357.81 \text{ Hp}$$

Se obtiene la potencia total.

$$P_{\text{total(Hp)}} = 357.81 \text{ Hp}$$



Una vez determinada la potencia se busca un motor con esta potencia y se obtienen los datos de torque y consumo específico de combustible y a cuantas (revoluciones por minuto) se tiene por ejemplo:

Potencia	450.00	BHP	a	1500	rpm
Torque	1,650.00	lb pie	a	1200	rpm
Consumo específico de combustible	0.12	lb / (bhp hr)	a	1200	rpm

Se escoge una transmisión y sus relaciones de caja para cada posición de la palanca, se tienen los siguientes datos:

Relación 1a	14.4
Relación 2a	12.29
Relación 3a	8.56
Relación 4a	7.3
Relación 5a	6.05
Relación 6a	5.16
Relación 7a	4.38
Relación 8a	3.74
Relación 9a	3.2
Relación 10a	2.73
Relación 11a	2.29
Relación 12a	1.98
Relación 13a	1.62
Relación 14a	1.38
Relación 15a	1.17
Relación 16a	1
Relación 17a	0.86
Relación 18a	0.73

Se escoge un diferencial:

La relación del diferencial que se escoge es del 4.3

Se hace el cálculo de la velocidad:

La siguiente ecuación permite obtener la velocidad de un vehículo en función de las diversas relaciones de la caja, del régimen del motor y del tamaño de las llantas.

$$V_{\text{vehículo}} = \frac{\text{RPM}_{\text{motor}} \cdot P \cdot 60}{R_{\text{diferencial}} \cdot R_{\text{caja}} \cdot 1,000}$$

Perímetro de la llanta = π (diámetro de la llanta)



Diámetro de la llanta = diámetro del rin + 2 (ancho de la sección (relación de aspecto))

Diámetro del rin en pulgadas = 24.5 pulg

Ancho de la sección = 280 mm

Relación de aspecto = 80%

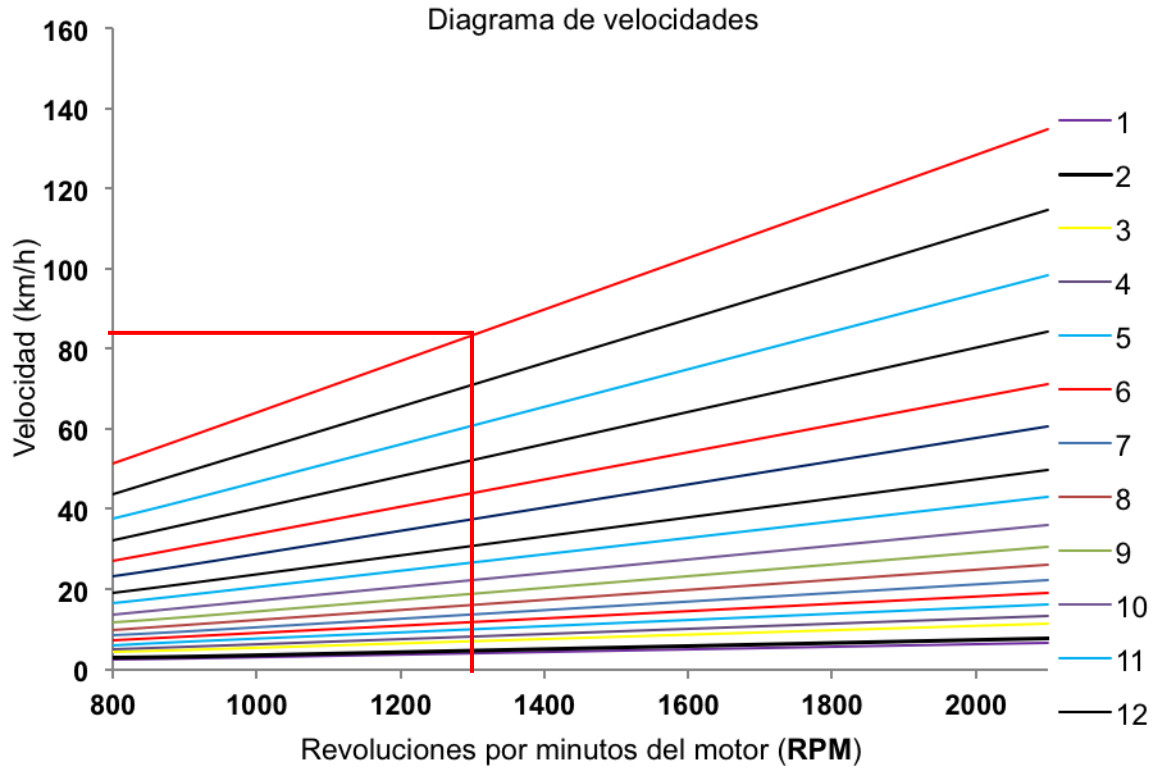
Altura de la goma = ancho por relación de aspecto

Se obtienen los siguientes datos:

V	RPM									
	800	1000	1200	1300	1400	1800	1900	2000	2100	2200
1	2.61	3.26	3.91	4.24	4.56	5.86	6.19	6.52	6.84	7.17
2	3.05	3.82	4.58	4.96	5.34	6.87	7.25	7.64	8.02	8.40
3	4.38	5.48	6.58	7.13	7.67	9.87	10.41	10.96	11.51	12.06
4	5.14	6.43	7.71	8.36	9.00	11.57	12.21	12.85	13.50	14.14
5	6.20	7.76	9.31	10.08	10.86	13.96	14.73	15.51	16.29	17.06
6	7.27	9.09	10.91	11.82	12.73	16.37	17.28	18.19	19.09	20.00
7	8.57	10.71	12.85	13.93	15.00	19.28	20.35	21.42	22.49	23.57
8	10.04	12.54	15.05	16.31	17.56	22.58	23.84	25.09	26.34	27.60
9	11.73	14.66	17.59	19.06	20.53	26.39	27.86	29.32	30.79	32.26
10	13.75	17.19	20.62	22.34	24.06	30.93	32.65	34.37	36.09	37.81
11	16.39	20.49	24.59	26.63	28.68	36.88	38.93	40.98	43.03	45.07
12	18.96	23.70	28.44	30.80	33.17	42.65	45.02	47.39	49.76	52.13
13	23.17	28.96	34.75	37.65	40.55	52.13	55.03	57.92	60.82	63.72
14	27.20	34.00	40.80	44.20	47.60	61.20	64.60	68.00	71.40	74.80
15	32.08	40.10	48.12	52.13	56.14	72.18	76.19	80.20	84.21	88.22
16	37.53	46.92	56.30	60.99	65.69	84.45	89.14	93.84	98.53	103.22
17	43.64	54.56	65.47	70.92	76.38	98.20	103.66	109.11	114.57	120.02
18	51.42	64.27	77.13	83.55	89.98	115.69	122.12	128.54	134.97	141.40

Rango óptimo de operación

Se obtiene el siguiente diagrama de velocidades:



Con estos valores se puede determinar la velocidad de operación (legalmente permitida), a 1300 rpm y en la última relación de la transmisión.

Para esta condición se busca el consumo específico. Y corresponde a 0.320 lb/HP h (Fig. 6.45).

1,650 lb ft Peak Torque 50 State

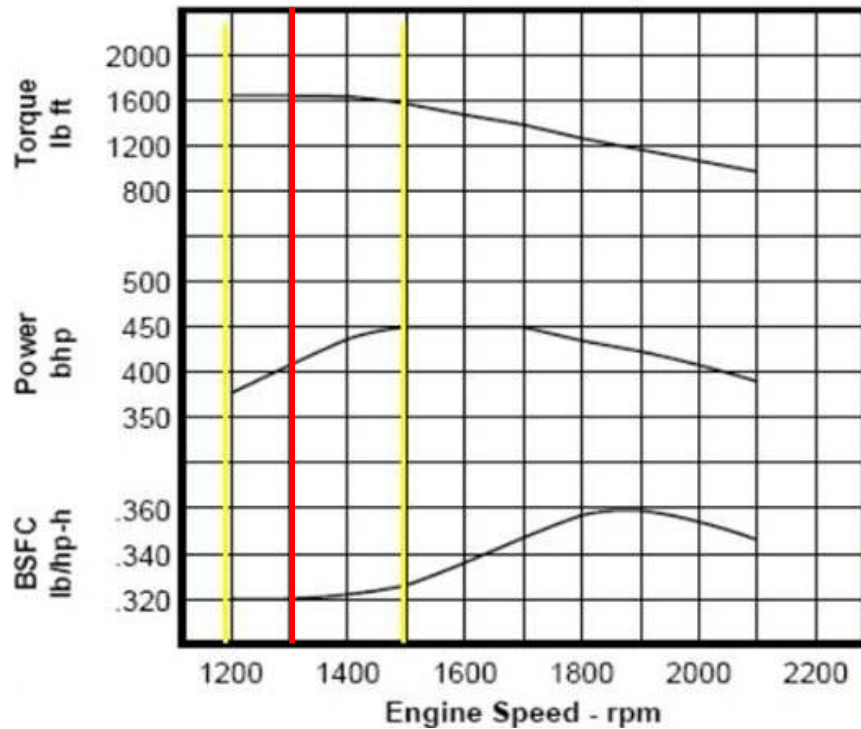


Fig. 6.45 Curvas características del motor

Se tiene que el consumo específico de combustible (C) es el siguiente:

$$C = 0.3213 \left(\frac{\text{lb}}{\text{HP h}} \right) \cdot P_{\text{total(HP)}} \cdot \left(\frac{0.45360 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} \right) \cdot \frac{1}{\rho_{\text{Diesel}}} \cdot \left(\frac{1,000 \text{ lt}}{1 \text{ m}^3} \right) = 61.4 \left(\frac{\text{lt}}{\text{h}} \right)$$

Al sustituir tenemos la siguiente expresión, que nos da el consumo de combustible, considerando un C_d de 0.82:

$$C = 0.3213 \left(\frac{\text{lb}}{\text{HP h}} \right) \cdot 357.81 \text{ (HP)} \cdot \left(\frac{0.45360 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} \right) \cdot \frac{1}{850} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \cdot \left(\frac{1,000 \text{ lt}}{1 \text{ m}^3} \right) = 61.4 \left(\frac{\text{lt}}{\text{h}} \right)$$

$$C_{C_d=0.82} = 61.4 \left(\frac{\text{lt}}{\text{h}} \right)$$



Referencias

- [1] Bonifacio Fernández Larrañaga. **Introducción a la mecánica de fluidos**, Alfa omega, Universidad Católica de Chile, 1999.
- [2] Frank White. **Mecánica de fluidos**, Mc Graw Hill, University of Rhode Island, 2004.
- [3] Yunes A. Cengel. **Mecánica de fluidos (fundamentos y aplicaciones)**, Mc Graw Hill, University of Nevada, 2006.
- [4] Morales Rafael Yolanda Mercedes, Jaime Gonzales Cervantes de Gortari, Alejandro Alfredo Lozano Guzmán, **Método para la configuración del tren motriz de vehículos de servicio pesado con uso eficiente de combustible**, Instituto Mexicano del Transporte, 2011.
- [5] Morales Rafael Yolanda Mercedes, Andrés Hernández Guzmán, **Manual de conducción técnica de vehículos automotores diesel: segunda edición**, Instituto Mexicano del Transporte, 2012.
- [6] Morales Rafael Yolanda Mercedes, Armando Zavala Ponce, **Selección del tren motriz de vehículos pesados (carga y pasajeros) destinados al servicio público federal**, Instituto Mexicano del Transporte, 1999.
- [7] Committee to Assess Fuel Economy Technologies for Medium- and Heavy-Duty Vehicles; National Research Council; Transportation Research Board, **Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty Vehicles, 2010**.
- [8] Rose McCallen, Fred Browand, James Ross, **The Aerodynamics: of Heavy Vehicles Trucks, Buses, and Trains, Vol 19**. University of Southern California, Springer, 2004.
- [9] Armando Maldonado Susano, **Factores que deben ser considerados en una norma de eficiencia energética en vehículos pesados**, trabajo de investigación, UNAM, 2014.
- [10] Kozvy Osorio Montes, **Análisis y evaluación del comportamiento energético de los vehículos automotores de la Administración Pública Federal**, tesis, UNAM, 2012.
- [11] Fox y McDonald's. **Introducción a la mecánica de fluidos**, John Wiley & Sons, Inc. Oklahoma State University, 2011.

Mesografía

- 1) Balance Nacional de Energía, **SENER**, revisión 2012, <http://is.gd/Z05ZGI>.
- 2) Balance Nacional de Energía, **SENER**, revisión 2011, <http://is.gd/ApQk2C>.
- 3) Estrategia Nacional de Energía 2013 - 2027, **SENER**, <http://is.gd/utBxeu>.
- 4) Foros de eficiencia energética en el transporte, **CONUEE**, <http://is.gd/RMbKVo>.