



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**REHABILITACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE
MECÁNICA DE FLUIDOS**

Patsy Obando

Asesorado por el Ing. Andy Williams Alonzo Vásquez

Guatemala, julio de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REHABILITACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE
MECÁNICA DE FLUIDOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

PATSY OBANDO

ASESORADO POR EL ING. ANDY WILLIAMS ALONZO VÁSQUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, JULIO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés De La Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordoñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
SECRETARIO	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

REHABILITACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería civil, con fecha mayo de 2018.

Patsy Obando

Guatemala 5 de mayo de 2020

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Departamento de Hidráulica
Coordinador

Estimado Ingeniero Aguilar:

Por medio de la presente HAGO CONTAR que he revisado el trabajo de graduación titulado **“REHABILITACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS”** de la estudiante de Ingeniería Civil, Patsy Obando, quien se identifica con registro académico 2010-80006 y carné P0327011, luego de haber hecho las correcciones necesarias, lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar el proceso correspondiente:

Sin otro particular, me despido deferentemente:

Id y enseñad a todos



ANDY WILLIAMS ALONZO VÁSQUEZ
MSc. INGENIERIA SANITARIA
INGENIERO CIVIL
COLABORADO 12,050

Asesor



Guatemala, 08 de mayo de 2,020

Ingeniero

Pedro Antonio Aguilar Polanco

Director de Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Aguilar Polanco:

Le informo que he revisado el Trabajo de Tesis de graduación, **REHABILITACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS** desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil, **Patsy Obando**, CUI P0327011, con Registro Académico No. 201080006 quién contó con la asesoría del Ing. Andy Williams Alonzo Vásquez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte a la academia y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa

Revisor del Departamento de Hidráulica

/remo





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala, 11 de mayo de 2020
DEIC-TG-EIC-002-2020/paap

El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ingeniero Andy Williams Alonzo Vásquez y del revisor del Departamento de Hidráulica Ingeniero Rafael Enrique Morales Ochoa al trabajo de graduación de la estudiante Patsy Obando **REHABILITACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director Escuela Ingeniería Civil



Interesado
Asesor
Jefe del Departamento de Hidráulica

Más de 140 años de Trabajo y Mejora Continua



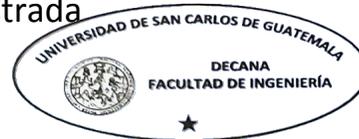


DTG. 227E.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **REHABILITACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS**, presentado por la estudiante universitaria: **Patsy Obando**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme dado padres excepcionales. Por brindarme sabiduría y paciencia cuando más lo he necesitado.
Mis padres	Bernie Obando y Miriam Obando.
Mi hermana	Julie Obando.
Mi esposo	Eduardo Alejandro Chavez Soto.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis padres	Por su gran amor, esfuerzo y confianza que han depositado en mí. Sin ustedes nada de esto hubiera sido posible. Los amo.
Mi hermana	Por tu apoyo. Soy feliz de tenerte como mi hermana y mi mejor amiga.
Mi esposo	Por tu paciencia y apoyo incondicional a lo largo de la carrera y en este trabajo de graduación.
Mi asesor	Agradezco su apoyo en la dirección y realización de esta tesis, la oportunidad de trabajar con usted durante el desarrollo de este trabajo y de adquirir nuevos conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos científicos y técnicos a través de los años.

	1.3.2.1.4.	Régimen supersónico ...	11
	1.3.2.1.5.	Régimen hipersónico	11
	1.3.3.	Número de Froude	12
	1.3.3.1.	Criterios del flujo.....	13
1.4.		Tipo de flujo en condición aerodinámica	13
	1.4.1.	Flujo laminas y flujo turbulento	13
1.5.		Fuerzas de arrastre y de sustentación	15
	1.5.1.	Medición de fuerza de arrastre y de sustentación ...	15
	1.5.2.	Densidad del aire	17
	1.5.3.	Área de superficie expuesta	18
	1.5.4.	Comportamiento de sólidos aerodinámicos.....	18
	1.5.4.1.	Nomenclatura del perfil alar.....	19
	1.5.4.2.	Análisis de los datos.....	21
2.		DEFINICIÓN GENERAL DE TUNEL DE VIENTO	27
	2.1.	Tipos de túneles de viento y su función	28
	2.2.	Partes del túnel de viento.....	29
	2.2.1.	Cono de contracción	30
	2.2.2.	Cámara de ensayos	30
	2.2.3.	Difusor de salida y ventilador	30
	2.2.4.	Indicador de velocidad	31
	2.2.5.	Indicador de sustentación.....	31
	2.2.6.	Indicador de arrastre	31
	2.2.7.	Tablero de piezómetros.....	32
	2.2.8.	Accesorios opcionales (Sólidos a ensayar)	32
	2.3.	Diagnóstico del túnel de viento	33
	2.3.1.	Motor	34
	2.3.2.	Modelos.....	35
	2.3.3.	Soporte de modelos	38

2.3.4.	Escala de arrastre y de sustentación.....	40
2.3.5.	Sección de entrada de aire	41
3.	INSTRUMENTACIÓN Y PUNTOS DE MEDICIÓN	43
3.1.	Flujo alrededor de objetos	43
3.2.	Arrastre sobre cuerpos sumergidos.....	44
3.2.1.	Coeficiente de arrastre	45
3.2.2.	Coeficiente de sustentación.....	46
3.3.	Velocidad.....	47
3.3.1.	Modo de operación del anemómetro	48
3.3.2.	Especificaciones de las unidades de velocidad y temperatura	48
3.3.3.	Medición de flujo en conductos.....	49
3.4.	Presión	50
4.	ENSAYOS DE LOS MODELOS	53
4.1.	Procedimiento de los ensayos.....	53
4.2.	Toma de datos.....	54
4.3.	Cálculos realizados	55
4.3.1.	Cálculo de presión del viento.....	56
4.3.2.	Cálculo de densidad del viento	56
4.3.3.	Cálculo para el cubo	56
4.3.3.1.	Cálculo de área.....	56
4.3.3.2.	Coeficiente de arrastre para el cubo....	57
4.3.3.3.	Coeficiente de sustentación para el cubo.....	58
4.3.4.	Cálculo para la placa rectangular	58
4.3.4.1.	Cálculo de área para la placa rectangular.....	59

4.3.4.2.	Coeficiente de arrastre para la placa rectangular	59
4.3.4.3.	Coeficiente de sustentación para la placa rectangular.....	60
4.3.5.	Cálculo para el cono.....	61
4.3.5.1.	Cálculo de área para el cono.....	61
4.3.5.2.	Coeficiente de arrastre para el cono	61
4.3.5.3.	Coeficiente de sustentación para el cubo	62
4.4.	Tabulación de resultados	63
4.4.1.	Cubo.....	63
4.4.2.	Placa rectangular	65
4.4.3.	Cono.....	66
4.5.	Interpretación de resultados.....	68
4.5.1.	Cubo.....	68
4.5.2.	Placa rectangular	70
4.5.3.	Cono truncado.....	72
4.5.4.	Comparación de resultados entre los 3 modelos ensayados	73
4.6.	Instructivo de laboratorio	74
CONCLUSIONES.....		81
RECOMENDACIONES		85
BIBLIOGRAFÍA.....		87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Capa límite	4
2.	Perfil alar	19
3.	Nomenclatura del perfil alar	20
4.	Gráfica de coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación vs. ángulo de ataque	22
5.	Diagrama polar.....	24
6.	Partes de túnel de viento.....	29
7.	Túnel de viento de laboratorio de mecánica de fluidos, USAC	33
8.	Motor.....	35
9.	Modelo: cono truncado.....	36
10.	Modelo: cubo.....	37
11.	Modelo: placa rectangular.....	37
12.	Varilla soporte de modelos.....	39
13.	Escalas de arrastre y sustentación originales	40
14.	Escalas de arrastre y sustentación reparados	41
15.	Sección de entrada del aire.....	42
16.	Anemómetro digital	47
17.	Gráfica coeficiente de arrastre y de sustentación de un cubo.....	64
18.	Diagrama polar del cubo	64
19.	Gráfica c_d y c_l de una placa rectangular	65
20.	Diagrama polar de una placa rectangular	66
21.	Gráfica coeficiente de arrastre y de sustentación de un cono.....	67
22.	Diagrama polar de un cono.....	67

23.	Cubo colocado en el túnel de viento	70
24.	Placa rectangular colocada en el túnel de viento.....	71
25.	Cono colocado en el túnel de viento	73

TABLAS

I.	Coeficiente de arrastre y sustentación para un perfil alar	21
II.	Velocidad del aire	49
III.	Temperatura del aire.....	49
IV.	Fuerza de arrastre y sustentación de un cubo	54
V.	Fuerza de arrastre y sustentación de una placa rectangular	55
VI.	Fuerza de arrastre y sustentación de un cono	55
VII.	Resultados obtenidos del cubo	63
VIII.	Resultados obtenidos de la placa rectangular	65
IX.	Resultados obtenidos del cono	66
X.	Temperatura y velocidad del aire.....	77
XI.	Toma de datos del cubo	78
XII.	Toma de datos de la placa rectangular.....	78
XIII.	Toma de datos del cono	79

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
HP	Caballo de fuerza
cm	Centímetros
C_D	Coeficiente de arrastre
C_L	Coeficiente de sustentación
R	Constante del aire
ρ	Densidad
D	Diámetro
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
K	Grados Kelvin
g	Gravedad
HZ	Hertz
kg	Kilogramos
lb	Libras
PSI	Libra por pulgadas cuadradas
\pm	Más menos
m	Metros
mm	Milímetro
min	Minutos
Fr	Número de Froude
M	Número de Mach
ft	Pie

%	Porcentaje
P	Presión de aire
D_H	Profundidad hidráulica
PVC	Policloruro de vinilo
RPM	Revoluciones por minuto
Re	Reynolds
s	Segundos
T	Temperatura
V	Velocidad
C	Velocidad del sonido
μ	Viscosidad dinámica

GLOSARIO

Aerodinámica	La aerodinámica es la ciencia que se ocupa del estudio del movimiento del aire y de las acciones que el mismo ejerce sobre los cuerpos que se mueven inmersos en él.
Aeronáutica	Es la ciencia que se encarga de estudiar, diseñar y elaborar todas aquellas herramientas que tengan la capacidad de volar.
Anemómetro	Instrumento que mide la velocidad o la fuerza del viento.
Densidad	Magnitud escalar que permite medir la cantidad de masa que hay en determinado volumen de una sustancia.
Fluido	Es todo cuerpo que tiene la propiedad de fluir, carece de rigidez y elasticidad, y en consecuencia cede inmediatamente a cualquier fuerza tendente a alterar su forma y adoptando así la forma del recipiente que lo contiene.
Flujo laminar	Movimiento ordenado y suave de un fluido.

Flujo turbulento	Se llama flujo turbulento al movimiento de un fluido que se da en forma caótica.
Fuerza de arrastre	Es una fuerza que actúa opuesta al movimiento relativo de cualquier objeto en movimiento.
Fuerza de sustentación	Es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, en dirección perpendicular a la de la velocidad de la corriente incidente.
Gravedad	La gravedad es una fuerza física que la Tierra ejerce sobre todos los cuerpos hacia su centro.
Hidráulica	La rama de la física que estudia las propiedades mecánicas de los líquidos, dependiendo de las fuerzas a las que son sometidos.
Inercia	La propiedad que tienen los cuerpos de permanecer en su estado de reposo relativo o movimiento relativo.
Presión	Es la fuerza ejercida de manera perpendicular sobre una unidad de superficie.
Temperatura	Es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, de un objeto o del medio ambiente en general.

Túnel de viento

Se emplea para estudiar la eficiencia aerodinámica. Los diseños aerodinámicos reducen la resistencia al avance.

Velocidad

La velocidad es la magnitud física que relaciona el cambio de posición en el tiempo.

Viscosidad

La resistencia que poseen los líquidos durante su fluidez y deformación.

RESUMEN

En la actualidad, la Facultad de Ingeniería cuenta con un túnel de viento que, desde hace varios años, se dejó de implementar en el laboratorio de mecánica de fluidos, y tampoco se cuenta con una guía para realizar ensayos en el laboratorio. Partiendo de este punto, surge la necesidad de realizar un diagnóstico con el fin de rehabilitar e implementar el equipo para contribuir con la preparación académica de los futuros profesionales del área de ingeniería civil, ingeniería ambiental, ingeniería mecánica e ingeniería industrial.

El diagnóstico del túnel de viento evidenció la falta de algunas partes y la posibilidad de realizar mejoras al equipo. A continuación, se rehabilitó el túnel de viento y se realizaron varios ensayos a tres tipos de modelos distintos para determinar su coeficiente de arrastre y sustentación, de esta forma se comprobó la aerodinámica en cada uno de ellos.

Se elaboró una guía de laboratorio para el ensayo de los diferentes tipos de modelos. Se prevé que esta guía sea útil para que los estudiantes conozcan la forma de toma de datos y cálculo para la obtención de resultados.

OBJETIVOS

General

Rehabilitar el túnel de viento para ensayos de laboratorio de mecánica de fluidos.

Específicos

1. Elaborar un diagnóstico del equipo.
2. Restaurar los componentes de medición del túnel de viento.
3. Simular la variación de velocidades entre el viento y los tres modelos, la placa rectangular, el cubo y el cono truncado.
4. Desarrollar un instructivo para práctica de laboratorio de mecánica de fluidos.

INTRODUCCIÓN

Un túnel de viento es una de las herramientas de investigación en laboratorio de fluidos. Se utiliza para el estudio de las características aerodinámicas que presentan los cuerpos al interactuar con un fluido. La importancia de esta herramienta reside en la posibilidad de realizar estudios de modelos a escala del prototipo real.

Entre las obras de ingeniería que se pueden experimentar modelos a escala son, puentes, edificios y cualquier otra forma geométrica, para analizar su comportamiento al estar en contacto con el fluido. Por medio del análisis de los modelos se puede calcular los coeficientes de arrastre y de sustentación, los cuales ayudan a determinar qué tan eficaz puede ser el diseño de cualquier modelo. Las fuerzas de arrastre y de sustentación dependen de la densidad del fluido al que se está sometiendo el cuerpo, la velocidad contra corriente del fluido, la forma y la orientación del cuerpo.

Por medio del trabajo de graduación, se redactará una guía de estudio para un túnel de viento que se encuentra en el laboratorio de mecánica de fluidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El objetivo es rehabilitar el equipo para realizar ensayos que brinden información acerca de, análisis del comportamiento de fluidos, la fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación, tras poner a prueba los modelos de formas geométricas. En este trabajo de graduación se emplearán tres modelos distintos: una placa rectangular, cubo y un cono truncado.

1. AERODINÁMICA BÁSICA

1.1. Capa límite

Es la zona donde el movimiento de un fluido es perturbado, por la presencia de un sólido con dicho fluido con el que está en contacto.

La capa límite se estudia para analizar la variación de velocidades en la zona de contacto entre un fluido y un objeto que se encuentra por donde el fluido se desplaza. La presencia de esta capa se debe, principalmente, a la existencia de la viscosidad del fluido. Esta capa límite permite que el objeto produzca una variación en el movimiento de las líneas de corriente más próximas a él.

El principio de Bernoulli indica que la variación de velocidades produce un cambio de presiones en el fluido, que pueden dar lugar a efectos como las fuerzas de sustentación y de resistencia aerodinámica.

En la atmósfera terrestre, la capa límite es la capa de aire cercana al suelo y que se ve afectada por la convección debida al intercambio diurno de calor y humedad.

En la aeronáutica esta capa límite se aplica a la aviación, soliendo optar por perfiles alares que generan una capa límite turbulenta, ya que este tipo de capa permanece adherida al perfil a mayores ángulos de ataque que la capa límite laminar, evitando así que deje de generar sustentación aerodinámica de manera brusca por el desprendimiento de la capa límite. El espesor de la capa

límite en la zona del borde de llegada es pequeño, pero aumenta a lo largo de la superficie. Todas estas características varían en función de la forma del objeto, es decir, menor espesor de capa límite cuenta con menor resistencia aerodinámica presente la superficie de dicho objeto.

1.1.1. Tipos de capa límite

Existen dos tipos de capa límite: la capa límite laminar y capa límite turbulenta.

La capa límite turbulenta, es más gruesa que la capa límite laminar, y debido a que el fluido se mueve en todas direcciones, la capa límite turbulenta disipa mayor energía, lo que causa que la fuerza de fricción derivada de ella sea mayor.

El flujo laminar puede parar o retroceder debido a que pierde velocidad a lo largo de la capa límite, el cual causa que la capa se separe de la superficie y que el flujo ya no siga la forma de la superficie. Cuando este efecto se da (la separación de la capa límite) por ejemplo en el ala de un avión, este puede dejar de sustentarse y caerse.

En el flujo laminar las partículas fluyen en láminas separadas y de forma ordenada. El espesor de la capa límite puede aumentar en su recorrido alrededor del objeto dependiendo de la forma de éste y el ángulo de incidencia. A medida que avanza la corriente, el espesor de la capa límite crece debido a que el aumento de la presión supone un obstáculo al avance del aire. Cuanto mayor sea la presión, más dificultades tendrán las partículas para seguir avanzando, hasta que llegue un momento en el cual no puedan avanzar más y retrocedan hacia atrás en busca de zonas de menor presión. Esto hace que se

comiencen a formar pequeños torbellinos de partículas lo cual origina la capa límite turbulento y produce el desprendimiento de la capa límite.

Por ello, es importante el estudio de la capa límite en el diseño, las formas de los elementos aerodinámicos deben ser analizadas, profundamente, para asegurarse de que la capa límite discurre en régimen laminar.

La capa límite turbulenta ofrece mucha mayor resistencia aerodinámica y por ello se busca retrasar al máximo la aparición de esta y, por consiguiente, el desprendimiento de la capa, que originará turbulencias que restan o anulan la efectividad aerodinámica a los elementos.

Es vital que la capa límite permanezca en régimen laminar, puesto que los elementos basan su funcionamiento en diferencias de presión de las corrientes que los rodean, que sólo se producen si los flujos de aire permanecen pegados a los mismos.

1.1.2. Capa límite sobre una placa plana en reposo

El caso más simple para estudiar es el de la capa límite que se forma sobre una placa plana en reposo y paralela a la dirección del flujo del fluido.

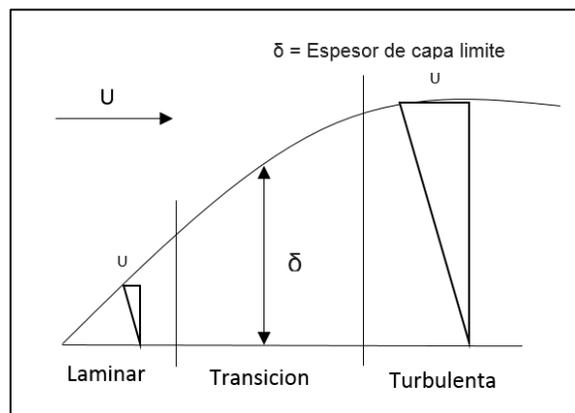
Este caso supone que hay una presión uniforme a lo largo, por ejemplo, en la figura 1, se observa que la velocidad varía asintóticamente de 0, en el fluido en contacto directo con la placa, hasta U luego de cierto espesor.

La arista aguas arriba de la placa que entra primero en contacto con el fluido se llama Borde de ataque.

La capa límite comienza en el borde de ataque de la placa; y luego se va engrosa paulatinamente, aguas abajo debido a que la tensión de cortadura tiende a frenar cada vez más partículas del fluido.

En la figura 1, se observa que en la primera parte de la capa, el flujo se mueve en capas delgadas que constituye un movimiento laminar, sin importar si el flujo antes de llegar a la placa era laminar.

Figura 1. **Capa límite**



Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Posteriormente, debido a que la capa se hace más gruesa, las fuerzas viscosas ya no pueden mantener el movimiento laminar y las partículas del fluido empiezan a tomar movimientos irregulares. A esto le denomina capa límite de transición, hasta llegar a tener movimientos completamente al azar formando la capa límite turbulenta, la cual continua indefinidamente si no existe el fenómeno de separación.

Esto indica, que a medida que crece la capa límite, mayor cantidad de fluido es desacelerado, por ello, adopta una velocidad menor a la que llevaba

antes de entrar en contacto con la superficie sólida. Hay, pues un cambio de cantidad de movimiento sobre la masa del fluido de espesor. Las fuerzas retardantes, llamadas fuerzas de arrastre producen este cambio. Estas fuerzas, llamadas de fricción, actúan cuando hay un movimiento relativo entre un fluido y un sólido sumergido en él.

Las propiedades en cada una de las etapas de la capa límite varían un tanto y, por ello, debe analizarse cada una por separado.

1.2. Fuerzas presentes en cuerpos dinámicos

Las leyes de Newton nos permiten estudiar el movimiento de los cuerpos a partir de las fuerzas que actúan sobre ellos. Es necesario que conozcamos cuales son las fuerzas que actúan sobre los cuerpos.

1.2.1. Fuerzas de inercia

Es la fuerza debido al impulso del fluido. Un fluido, cuanto más denso sea y mayor sea la velocidad, más impulso (inercia) posee. Estas fuerzas de inercia dan lugar a la presión dinámica.

1.2.2. Fuerza viscosa

Al moverse, los fluidos experimentan ciertos efectos debidos a fuerzas de rozamiento o fuerzas viscosas. La viscosidad es responsable de las fuerzas de fricción que actúan entre las capas del fluido, está viscosidad surge de las fuerzas de cohesión entre las moléculas de la sustancia. En los líquidos, la viscosidad disminuye con la temperatura, mientras que en los gases la viscosidad aumenta con la temperatura.

La ecuación de Bernoulli es siempre válida para fluidos en reposo ya que, en este caso, las fuerzas viscosas no tienen ningún efecto, pero para los fluidos en movimiento se ha de evaluar los efectos de dichas fuerzas.

En la práctica, se observa que se requiere una diferencia de presión para conseguir la circulación de un fluido a través de un tubo horizontal.

Esta diferencia de presión es necesaria debido a la fuerza de arrastre o de frenado que ejerce el tubo sobre la capa de fluido en contacto con él y a la que ejerce cada capa de fluido sobre la adyacente que se está moviendo con distinta velocidad. Estas fuerzas de arrastre o de frenado se denominan fuerzas viscosas. Como resultado de su presencia, la velocidad del fluido tampoco es constante a lo largo del diámetro de la tubería siendo mayor cerca de su centro y menor cerca de sus bordes, en donde el fluido entra en contacto con las paredes de esta.

Esta estructura de capas o flujo laminar se presenta en los fluidos viscosos a baja velocidad, en el cual puede considerarse la velocidad media como la mitad de la velocidad máxima.

$$v_{promedio} = \frac{1}{2} v_{max} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Cuando la velocidad del fluido aumenta suficientemente, el flujo cambia de carácter y se vuelve turbulento, entonces, se generan torbellinos o remolinos irregulares. En general, el flujo turbulento es indeseable ya que disipa más energía mecánica que el flujo laminar. Por ejemplo, los aviones y los coches se diseñan de forma que el flujo de aire en sus proximidades sea lo más laminar posible.

1.2.3. Fuerza de gravedad

La gravedad es una de las cuatro interacciones o fuerzas fundamentales. La fuerza de gravedad origina la aceleración que experimenta un cuerpo físico en las cercanías de un objeto astronómico. También se denomina interacción gravitatoria o gravitación. Si se está en las proximidades de un planeta, experimentamos una aceleración dirigida hacia la zona central de dicho planeta. En la superficie de la tierra, la aceleración originada por la gravedad es aproximadamente nueve puntos ochenta y unos metros sobre segundo al cuadrado (9,81 m/s²).

En física, gravedad se denomina la fuerza que ejerce la tierra sobre todos los cuerpos, atrayéndolos hacia su centro, siendo la gravedad la responsable que hace que los objetos caigan al suelo y la que crea la sensación de peso. Asimismo, es responsable de todos los movimientos que observamos en el universo.

El físico, matemático Sir Isaac Newton propuso la ley de gravitación universal o teoría de la gravedad. Afirmó que todo objeto que posee masa ejerce una atracción gravitatoria sobre cualquier otro objeto con masa más allá de la distancia existente entre ambos. A mayor masa, mayor fuerza de atracción; y por otra parte, a mayor cercanía entre los objetos, mayor fuerza de atracción.

1.2.4. Fuerza elástica

La ley de elasticidad de Hooke recibe su nombre del físico inglés Robert Hooke y comprende numerosas disciplinas, siendo utilizada en ingeniería y construcción, así como en la ciencia de los materiales.

Esta ley, originalmente formulada para casos de estiramiento longitudinal, establece que el alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada sobre el mismo, es decir todo cuerpo elástico reacciona contra la fuerza deformadora para recuperar su forma original y como la fuerza aplicada es proporcional a la deformación producida, la fuerza deformadora deberá tener el mismo valor y dirección, pero su sentido será el contrario. La ley se aplica a materiales elásticos hasta un límite denominado límite elástico.

1.3. Relación de fuerzas en condiciones aerodinámicas

Existen parámetros que representan el análisis del tipo de flujo que está presente. Estos parámetros dependen de diferentes factores los cuales se detallarán a continuación.

1.3.1. Número de Reynolds

El número de Reynolds representado como "Re" es un número adimensional. Este número se usa en la mecánica de fluidos y dentro de los fenómenos de transporte, de tal manera que con este número se puede determinar el movimiento de un fluido.

Debe su nombre a Osborne Reynolds, científico que descubrió este número en el año 1883. Este número aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (Número de Reynolds pequeño) o turbulento (Número de Reynolds grande).

Cuando el fluido circula por el interior de una tubería circular recta, el número de Reynolds es representado como:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$Re = \frac{v_s D}{\nu} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

v_s : Velocidad característica del fluido

D: Diámetro de la tubería

μ : Viscosidad dinámica del fluido

ν : Viscosidad cinemática del fluido

El número de Reynolds permite predecir el carácter turbulento o laminar en ciertos casos. En conductos o tuberías, si el número de Reynolds es menor de 2 000 el flujo se considera laminar y si es mayor de 3 000, turbulento.

En ingeniería aeronáutica el flujo sobre la capa límite de la corriente de aire es sumamente importante. La transición ocurre normalmente para valores de número de Reynolds entre medio millón y 10 millones y se producirá antes o después dependiendo en gran medida de la superficie, la rugosidad de la superficie, de la turbulencia de la corriente libre de aire y de la distribución de presiones.

Mientras que en donde el fluido considerado es el agua, se ha demostrado mediante experimentación en laboratorio que entre un número de Reynolds de 2,00 a 4,00 se encuentra la etapa de transición laminar-turbulento en el flujo de la capa límite.

1.3.2. Número de Mach

El número de Mach recibió ese nombre en honor a Ernst Mach (1838 - 1916), quien condujo los primeros experimentos significativos relacionados con el vuelo supersónico.

Es uno de los parámetros más importantes de los flujos unidimensionales que se presentan en el análisis de flujo compresible. El número de Mach es la relación de la velocidad local del flujo a la velocidad local del sonido dentro del fluido.

$$M = \frac{V}{c} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

V: Velocidad local

c: Velocidad del sonido

En el sentido de fuerzas, el número de Mach es la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas originadas por la compresibilidad del fluido. Es un término constantemente utilizado por los ingenieros aerodinámicos, para tratar el movimiento de los fluidos sobre los objetos.

1.3.2.1. Regímenes de flujo según el número de Mach (M)

Teniendo como base el número de Mach se definen generalmente cinco regímenes de flujo descritos a continuación.

1.3.2.1.1. Régimen incompresible

El número de Mach es pequeño en comparación con la unidad (Aproximadamente 0,2 en un gas perfecto). En esta clasificación, los efectos de compresibilidad se consideran, generalmente insignificantes.

1.3.2.1.2. Régimen subsónico

El número de Mach es inferior a la unidad, pero tiene una magnitud suficiente para quedar fuera de la clasificación del régimen de un flujo incompresible.

1.3.2.1.3. Régimen transónico

El número de Mach es muy cercano a uno, es decir varía de valores ligeramente menor a la unidad y escasamente superiores a ella.

1.3.2.1.4. Régimen supersónico

Es donde el número de Mach es superior a la unidad.

1.3.2.1.5. Régimen hipersónico

Es cuando el número de Mach es muy superior a la unidad.

Por ejemplo, un avión que viaja con una velocidad de entre Mach 0,75 y Mach 1,20 tiene áreas en su superficie que experimentan ambos tipos de flujo: subsónico y supersónico; los ingenieros aerodinámicos se refieren a este régimen de vuelo (Escala de velocidades) con el nombre de régimen transónico.

1.3.3. Número de Froude

El número de Froude cuya abreviatura es Fr, es un número adimensional, el cual relaciona el efecto de las fuerzas de inercia con las fuerzas de gravedad las cuales actúan sobre un fluido. Este tipo de número recibe este nombre, en honor al ingeniero inglés William Froude.

La fórmula para hallar el número de Froude es la siguiente:

$$Fr = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de gravedad}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Cuando el número de Froude se encuentra en un canal se conoce como:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD_H}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

v: Velocidad media de la sección del canal (m/s)

D_H : Profundidad hidráulica (A/T) (m) (A es el área de la sección transversal del flujo y T el ancho de la lámina libre)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

El número de Froude es un parámetro importante, solo si la gravedad es un factor que influye en el movimiento de un fluido. Cuando existen movimientos con superficie sin líquido, el movimiento dependerá de si el número de Froude es mayor o menor que la unidad.

1.3.3.1. Criterios del flujo

($F > 1$): Si el número de Froude es mayor a la unidad, el flujo será conocido como supercrítico.

($F < 1$): Si el número de Froude es menor a la unidad, al flujo se le denominará subcrítico.

($F = 1$): Si el número de Froude es igual a la unidad, el flujo será conocido como crítico.

El número de Froude es muy importante dentro de la física hidráulica, lo que permite la relación del efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad, ambos actuando sobre un fluido.

El número de Froude tiene gran aplicación en la ingeniería civil, como lo es en los canales abiertos, ya que nos informa el estado del flujo hidráulico, teniendo claro que el flujo con el que se va a trabajar va a ser únicamente agua.

1.4. Tipo de flujo en condición aerodinámica

Existen dos tipos de flujo que determinan el movimiento de un fluido.

1.4.1. Flujo laminar y flujo turbulento

Se llama flujo laminar, al movimiento de un fluido cuando éste es ordenado, estratificado y suave.

En un flujo laminar el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse y cada partícula de fluido sigue una trayectoria llamada línea de corriente.

Se llama flujo turbulento o corriente turbulenta al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, en que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos periódicos, (No coordinados). Debido a esto, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta escala, a partir de la cual la trayectoria de esta es impredecible, más precisamente caótica.

La razón por la que un flujo puede ser laminar o turbulento tiene que ver con lo que pasa a partir de una pequeña alteración del flujo, una perturbación de los componentes de velocidad. Dicha alteración puede aumentar o disminuir y cuando la perturbación en un flujo laminar aumenta y el flujo es inestable, este puede cambiar a turbulento y si dicha perturbación disminuye el flujo continúa laminar.

Existen tres parámetros físicos que describen las condiciones de flujo, estos son:

Escala de longitud del campo de flujo: si es bastante grande, una perturbación del flujo podría aumentar y el flujo podría volverse turbulento.

Escala de velocidad: si es bastante grande podría ser turbulento el flujo.

Viscosidad cinemática: si es pequeña el flujo puede ser turbulento.

1.5. Fuerzas de arrastre y de sustentación

El arrastre es la fuerza ejercida por el fluido en dirección contraria a la fuerza que ejerce el cuerpo en movimiento. Es decir, es una fuerza que el fluido opone, contrarrestando el movimiento de un cuerpo, este fenómeno puede ser observado cotidianamente en cualquier medio de transporte, dado que éstos se desplazan inmersos en fluidos. La fuerza de arrastre debe contrarrestarse con una fuerza de propulsión que vaya en dirección opuesta al arrastre. Para obtener esta fuerza, se requiere el empleo de cierta energía, por lo que siempre se busca disminuir el arrastre.

La fuerza de sustentación es la fuerza ocasionada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo. Su aplicación más importante se encuentra en el diseño de partes de aviones y aeronaves, particularmente en las alas, llamadas aeroplanos. Con base en el análisis de fuerzas, se obtiene cierta geometría que permite que exista fuerza de sustentación tanto encima como por debajo del aeroplano. A la vez, se debe considerar que la fuerza de sustentación debe ser al menos igual que el peso de la aeronave para que esta vuele.

1.5.1. Medición de fuerza de arrastre y de sustentación

Las fuerzas de arrastre se pueden calcular, y se expresan matemáticamente mediante la fórmula:

$$F_D = \text{Arrastre} = C_D \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) A \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

C_D : Coeficiente de arrastre, es un número adimensional que depende de la forma del objeto y su posición con respecto al flujo

ρ : Densidad del fluido, se debe considerar que en general las densidades de los líquidos son mayores que las de los gases, por lo que la magnitud de la fuerza de arrastre siempre será mayor en un líquido que en un gas. Además, la compresibilidad del aire afecta un poco su densidad.

v : Velocidad de la corriente de fluido en relación al objeto. En general no importa si lo que se mueve es el fluido o el objeto

A : Área característica del cuerpo

La medición de la fuerza de arrastre “FD” y la velocidad “v” se puede determinar en un túnel de viento subsónico, habilitado con una balanza mecánica y medidor de velocidad del tipo manómetro inclinado, la fuerza de arrastre se mide en la balanza del túnel de viento.

Las fuerzas de sustentación se pueden calcular, y se expresan matemáticamente mediante la fórmula:

$$F_L = \text{Sustentacion} = C_L \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) A \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

F_L : Fuerza de sustentación (kg)

C_L : Coeficiente de sustentación

ρ : Densidad del fluido $\frac{kg \cdot s^2}{m^4}$

V : Velocidad no perturbada o de corriente libre del fluido (m/s)

A : Área del cuerpo que está en contacto con el fluido o área transversal (m²)

1.5.2. Densidad del aire

La densidad de cualquier cuerpo sólido, líquido o gaseoso expresa su cantidad de masa por unidad de volumen, por lo tanto, la densidad del aire es la cantidad de masa de aire por unidad de volumen. La densidad del aire es poca si se compara con la del agua, pero es precisamente lo que hace posible el vuelo de las aeronaves.

Las variaciones de presión y temperatura afectan la densidad del aire. La densidad aumenta o disminuye en relación directa con la presión y en proporción inversa a la temperatura del aire.

La densidad del fluido aire se calcula con la presión atmosférica y la temperatura ambiente en la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{P}{RTg} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

ρ :: Densidad del aire ($\frac{kg \cdot s^2}{m^4}$)

P: Presión del aire ($\frac{g}{cm^2}$)

R: Constante del aire = 29,3

T: Temperatura absoluta (K)

g: Gravedad $9,81 \frac{m}{s^2}$

1.5.3. Área de superficie expuesta

El área de superficie expuesta es el área frontal del cuerpo perpendicular a la velocidad del fluido. Lo más común es considerar al área transversal como el área característica o área proyectada, sin embargo, en cuerpos de diseño muy característico, como vagones de trenes de pasajeros o dirigibles, se puede utilizar el área de la superficie. Cuando se emplea un área transversal, se habla de un arrastre de forma o de presión. Cuando se utiliza el área de la superficie, se estudia un arrastre de fricción.

- Arrastre de presión: también llamado arrastre de forma, debida a los disturbios que causa el paso del objeto, lo que crea una estela turbulenta. Las características de estos disturbios dependen de la forma del cuerpo e incluso a veces del número de Reynolds del fluido y el coeficiente de rugosidad de la superficie de contacto.
- Arrastre de fricción: son las fuerzas cortantes que actúan en la capa de fluido que cubre a la superficie de contacto del cuerpo, la cual recibe el nombre de capa límite.

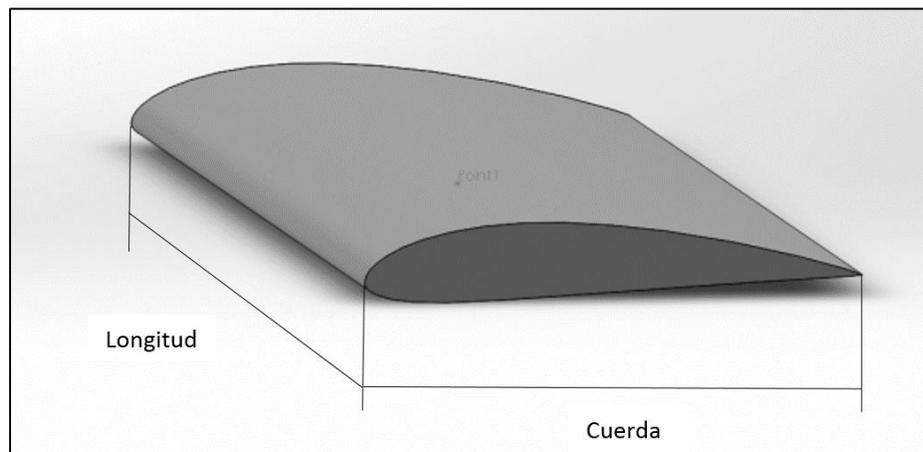
1.5.4. Comportamiento de sólidos aerodinámicos

El análisis del comportamiento de sólidos aerodinámicos se basa en un perfil de ala o perfil aerodinámico. En aeronáutica se denomina perfil alar a la forma del área transversal de un elemento, que al desplazarse a través del aire es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que genere sustentación. Es una de las consideraciones más importantes en el diseño de superficies sustentadoras como alas, o de otros cuerpos similares como hélices o rotores en helicópteros.

Según el propósito que se persiga en el diseño, los perfiles pueden ser más finos o gruesos, curvos o poligonales, simétricos o no, e incluso el perfil puede ir variando a lo largo del ala.

En este caso vamos a analizar un perfil alar con una relación de 20 %. Esta relación hace referencia a la parte más gruesa con la longitud del cordón.

Figura 2. **Perfil alar**

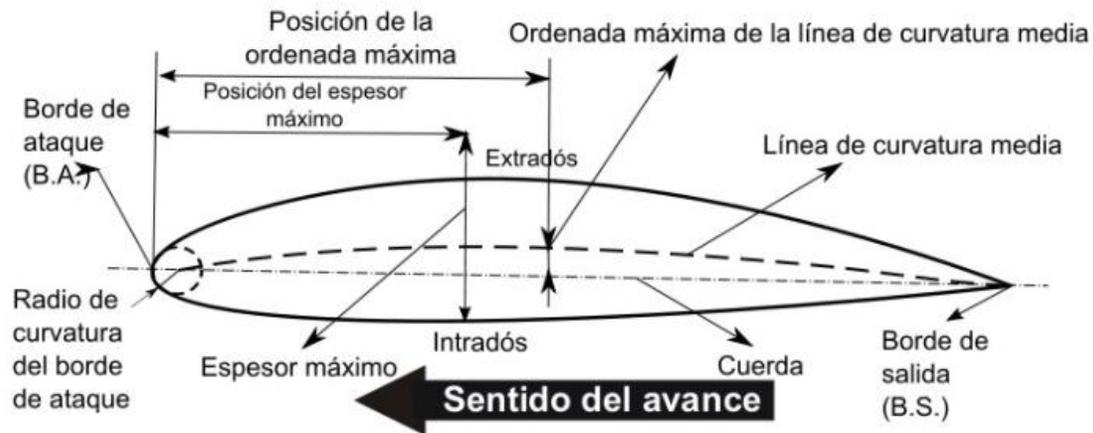


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCad.

1.5.4.1. Nomenclatura del perfil alar

El perfil alar es utilizado para la medición de la fuerza de sustentación y de arrastre, por lo cual es necesario saber sus componentes.

Figura 3. **Nomenclatura del perfil alar**



Fuente: CARMONA, Aníbal Isidoro. Aerodeporte.

<https://aerodeporte.blogspot.com/2016/09/nomenclatura-y-terminologia-del-perfil.html>. Consulta: 12 de marzo de 2020.

- Extradós. Es la superficie superior del ala.
- Intradós. Es la superficie inferior del ala.
- Borde de ataque/Leading edge. Es el borde delantero del ala. Es la parte del ala que primero entra en contacto con del flujo del aire.
- Borde de salida/Trailing edge. Es el borde posterior del ala. Es la parte del ala por donde sale el flujo del aire.
- Cuerda/Chord (c). Es la línea recta que une el borde de ataque con el borde de salida.
- Línea de curvatura media. Es una línea equidistante entre el extradós y el intradós.
- Ordenada máxima a la línea de curvatura media. Es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la cuerda.
- Espesor máximo. Es la distancia máxima entre el extradós y el intradós.

- Radio de curvatura del borde de ataque. Es el radio de un círculo tangente al extradós e intradós que define la forma del borde de ataque.

1.5.4.2. Análisis de los datos

Los coeficientes de arrastre y de sustentación para un perfil alar con relación igual al 20 % están dados en la siguiente tabla.

Tabla I. **Coefficiente de arrastre y sustentación para un perfil alar**

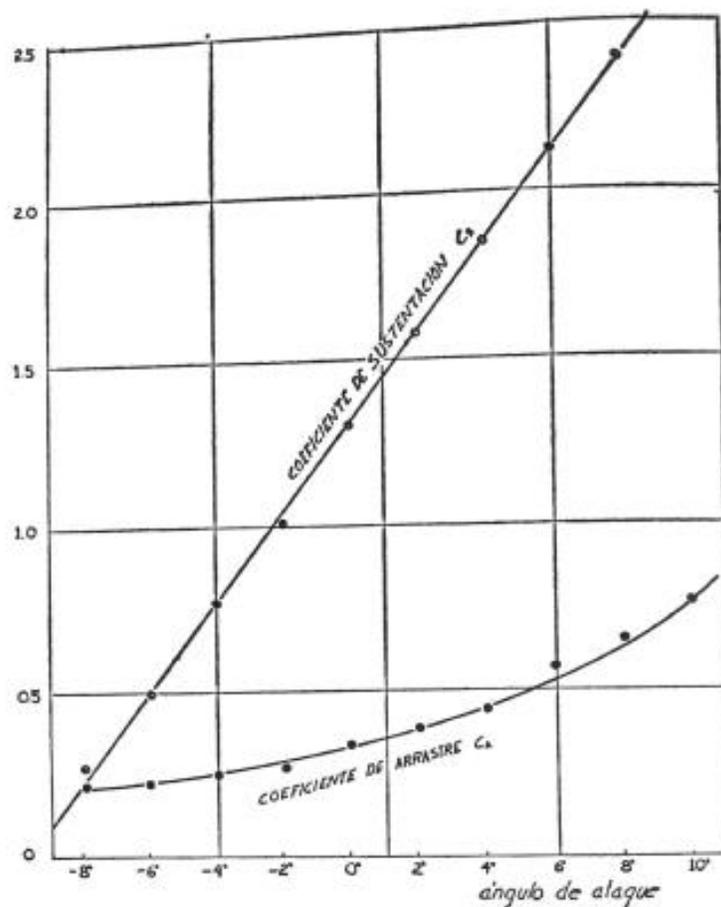
Ángulo (°)	Cs	Ca
-8	0,27	0,214
-6	0,495	0,225
-4	0,766	0,248
-2	1,013	0,27
0	1,306	0,338
2	1,576	0,383
4	1,802	0,45
6	2,139	0,563
8	2,387	0,653
10	2,657	0,766

Fuente: MARROQUÍN BÚCARO, Héctor Alfonso. *Guía para el laboratorio de mecánica de fluidos*. p.102.

Con los datos de coeficiente de arrastre y de sustentación se obtiene la gráfica del comportamiento del perfil alar. En el eje de las abscisas tiene el ángulo de ataque al que fue sometido el perfil alar contra la corriente de aire, y

en el eje de las coordenadas están los coeficientes de arrastre y de sustentación a como se puede ver en la figura 4 a continuación.

Figura 4. **Gráfica de coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación vs. ángulo de ataque**



Fuente: MARROQUÍN BÚCARO, Héctor Alfonso. *Guía para el laboratorio de mecánica de fluidos*. p.104.

Al examinar la curva C_s contra ángulo de ataque, se puede observar que a medida que el ángulo de ataque aumenta, la fuerza de sustentación también

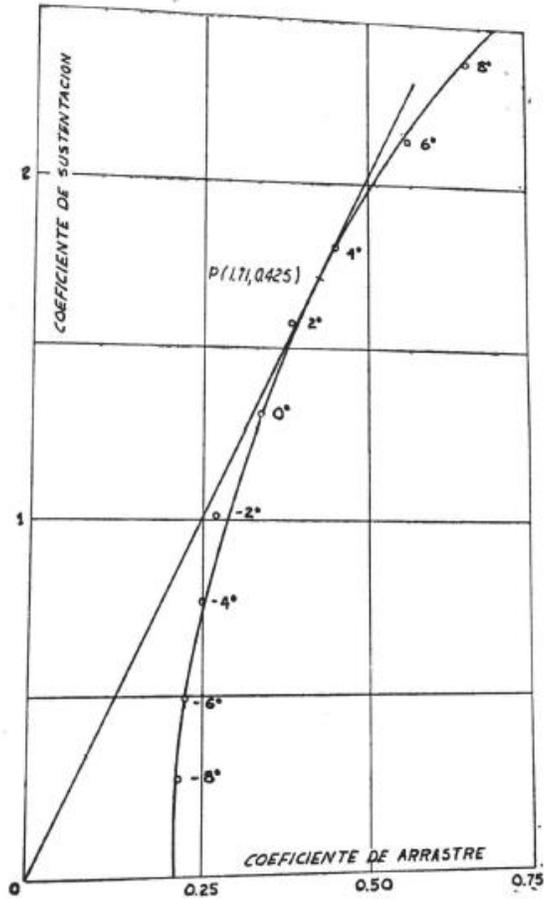
aumenta, y se puede observar que esta variación sigue la tendencia de una línea recta.

Ahora bien, cuando se evalúa la curva C_a contra ángulo de ataque, se puede observar que el arrastre también aumenta con el ángulo de ataque, aunque en este caso su variación es parabólica.

El aspecto más importante para ver la eficacia de un cierto perfil es la relación entre la sustentación a cierto ángulo y el arrastre respectivo. Dicha relación debe ser la mayor posible en un buen diseño de perfil.

El diagrama polar de un perfil aerodinámico expresa la variación del coeficiente de sustentación en función del coeficiente de arrastre. Se llama curva polar porque tiene dos propiedades cuando los coeficientes de sustentación y de arrastre se dibujan a la misma escala. En el diagrama polar del perfil alar en la figura 5 se observa que la variación sigue una tendencia parabólica.

Figura 5. Diagrama polar



Fuente: MARROQUÍN BÚCARO, Héctor Alfonso. *Guía para el laboratorio de mecánica de fluidos*. p. 103.

Uno de los aspectos más importantes para ver la eficiencia de un cierto perfil es la relación entre la sustentación y el arrastre respectivo a cierto ángulo. Esta relación debe ser la mayor posible en un buen diseño de perfil. Para poder encontrar dicha relación, se traza una tangente al Diagrama polar que pasa por el origen.

Para este caso, dicha pendiente es de $(1,71/0,425) = 4$, a un ángulo de ataque de $3,2^\circ$, como se puede observar en la figura 5.

En este caso se puede notar que el coeficiente de sustentación es alto, el cual es deseable, pero también el coeficiente de arrastre es elevado, por lo que, en este caso, dicho perfil alar sólo se podría usar para aviones de poca velocidad.

2. DEFINICIÓN GENERAL DE TUNEL DE VIENTO

En ingeniería, un túnel de viento (También llamado túnel aerodinámico) es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos. Con esta herramienta se simulan las condiciones que experimentará el objeto de la investigación en una situación real. En un túnel de viento, el objeto o modelo, permanece estacionario mientras se propulsa el paso de aire o gas alrededor de él y se utiliza para estudiar los fenómenos que se manifiestan cuando el aire baña objetos como edificios, puentes, aviones, naves espaciales y automóviles.

El aire es soplado o aspirado a través de un conducto equipado con rejillas estabilizadoras al comienzo para garantizar que el flujo se comporte de manera laminar o con obstáculos u otros objetos si se desea que se comporte de forma turbulenta. Los modelos se montan para su estudio en un equipo llamado balanza, a la cual están adosados los mecanismos que brindan la información necesaria para calcular los coeficientes de sustentación y arrastre, necesarios para conocer si es factible o no emplear el modelo en la vida real. Además, son empleados otros dispositivos para registrar la diferencia de presiones en la superficie del modelo en cuestión. Los resultados prácticos deben compararse con los resultados teóricos, teniendo fundamentalmente en cuenta el Número de Reynolds y el Número Mach que constituyen los criterios de validación en las pruebas con modelos a escala.

2.1. Tipos de túneles de viento y su función

Los túneles aerodinámicos se pueden clasificar en función a varios aspectos los cuales son:

- Por la circulación del aire en su interior
- Por la velocidad del flujo en su interior
- Según como se impulse el fluido

Por la circulación del aire en su interior:

Abierto. Se toma el aire directamente de la atmosfera y después de hacerlo pasar por la cámara de ensayo se devuelve nuevamente a ella.

Cerrado. El aire circula varias veces por la cámara, recuperando por medio de un difusor se energía fluida, antes de llegar de nuevo a la zona se encuentra instalado el difusor.

Por la velocidad del flujo en su interior:

- Túnel subsónico: $Mach < 1$
- Túnel transónico: $Mach = 1$
- Túnel supersónico: $Mach > 1$
- Túnel hipersónico: $Mach > 5$

Por cómo se impulse el fluido:

- Soplado: el ventilador se encuentra dentro del modelo, proporciona más velocidad, pero el flujo se vuelve turbulento.

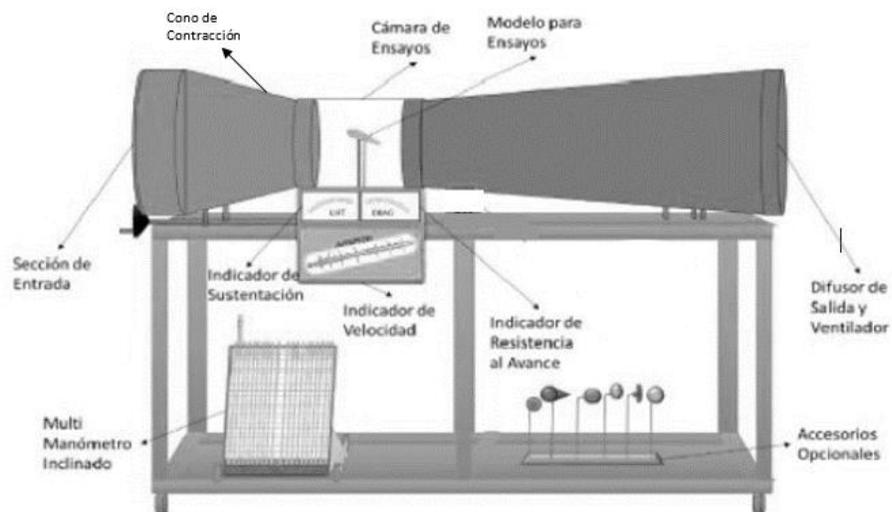
- Aspirado: el ventilador se encuentra detrás del modelo, proporciona menos velocidad, pero el flujo es laminar.

El túnel de viento con el que contamos en el laboratorio de Mecánica de Fluidos es un túnel de viento abierto, subsónico y debido a que el ventilador se encuentra detrás de los modelos es de tipo “aspirado”.

2.2. Partes del túnel de viento

Es necesario conocer las partes de un túnel de viento para poder comprender su funcionamiento.

Figura 6. Partes de túnel de viento



Fuente: BETANCOURT MENDOZA, Iván Vladimir. *Acondicionamiento de un Túnel de Viento para pruebas aerodinámicas y prácticas de laboratorio en la UNAH*. p. 256.

2.2.1. Cono de contracción

Su función es aumentar la velocidad de flujo, al contrario que el difusor, y se sitúa en la cámara de ensayo. El cono de contracción aprovecha el efecto Venturi y reduce el trabajo del ventilador.

2.2.2. Cámara de ensayos

Es la parte más importante del túnel. En ella se coloca el objeto por estudiar y se realizan las mediciones. Es muy importante que el flujo que la atrevese sea lo más uniforme posible. La dimensión de la cámara de ensayos es de 30 centímetros de diámetro.

2.2.3. Difusor de salida y ventilador

Difusor de salida. Cuando el aire ya ha salido de la cámara de ensayos, el difusor reduce la velocidad del flujo mediante su perfil divergente. Interesa que el aire salga a la menor velocidad posible ya que la velocidad de salida irá relacionada con las pérdidas energéticas del túnel. A menor velocidad, menores son las pérdidas.

Ventilador. Su función es crear un flujo de aire a una velocidad determinada. Normalmente el ventilador tiene una velocidad determinada para la realización de los ensayos, aunque algunos túneles de viento cuentan con aparatos electrónicos para poder variar la velocidad y así realizar ensayos bajo las condiciones deseadas por los ingenieros.

2.2.4. Indicador de velocidad

El indicador de velocidad puede ser un manómetro de tubo inclinado, el cual mide e indica la velocidad de la corriente de aire (En millas/hora) que pasa a través de la cámara de ensayo.

El manómetro es un instrumento muy útil para la medición de presiones. Debido a la inclinación de la columna de líquido el instrumento posee una mayor sensibilidad, la cual aumenta de acuerdo con el ángulo de inclinación. Dicho manómetro también es muy útil para la medición de velocidades en corrientes de aire, como es en el caso del túnel de viento.

Muchos aviones pequeños utilizan estos dispositivos para poder estimar la velocidad con la que se mueve la aeronave.

2.2.5. Indicador de sustentación

Cuando el flujo del aire pasa por la cámara de ensayos, ejerce una fuerza de sustentación en el modelo que se está ensayando. Esta fuerza es la que el modelo opone al flujo aire y es registrada por el indicador de fuerza en libras. Se registra en sentido perpendicular al flujo del aire.

2.2.6. Indicador de arrastre

Indica la fuerza de arrastre (En libras) que posee el modelo en la cámara de ensayo cuando se le hace pasar el fluido.

Cuando el flujo del aire pasa por la cámara de ensayos, ejerce una fuerza de arrastre en el modelo que se está ensayando. Esta fuerza es la que el

modelo opone al flujo aire y es registrada por el indicador de fuerza en libras, esta fuerza es la que es registrada en sentido paralelo al flujo del aire.

2.2.7. Tablero de piezómetros

El manómetro es un dispositivo fundamental, el cual es utilizado para la medición de la presión de flujos, este equipo funciona determinando la diferencia entre la presión del fluido y la presión atmosférica local.

Se usa como herramienta en los túneles de viento aeronáuticos para tener una distribución de presiones a lo largo de un cuerpo de estudio. El rango de presiones puede variar entre 10-8 y 2-10 mm de mercurio de presión absoluta, en experimentos de alto vacío hasta millones de atmosferas en controles y prensas de carácter hidráulico.

2.2.8. Accesorios opcionales (Sólidos a ensayar)

Cuando se pretende conocer la medida directa de la resultante de las cargas de viento, las escalas típicas de los modelos están entre 1/75 y 1/500. Dicho modelo se fija a una balanza que mide la carga total que actúa sobre él. Para esto existen balanzas de alta frecuencia especialmente diseñadas, que pueden emplearse para medir la carga de viento total fluctuante sin distorsiones significativas producidas por las vibraciones naturales del modelo. Una placa rectangular, un cubo y un cono truncado serán los modelos que se utilizarán para los ensayos en este trabajo de graduación.

Al ensayar estos modelos, se determinará la fuerza de arrastre y de sustentación que experimenta cada de uno de los modelos, para, determinar el

coeficiente de arrastre y de sustentación para evaluar la aerodinámica de los modelos.

2.3. Diagnóstico del túnel de viento

Se evaluó el túnel de viento que se encuentra en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería, el cual permitió ver que partes necesitan reemplazo y las que aún están en funcionamiento.

Se observó que el túnel de viento carece del motor, y la faja el cual hace que funcione el ventilador, así mismo, faltan los modelos que se evaluarán en el túnel de viento.

Figura 7. **Túnel de viento de laboratorio de mecánica de fluidos, USAC**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos T-5, Facultad de Ingeniería.

2.3.1. Motor

La evaluación del túnel de viento se evidenció que carece del motor, el cual es una pieza fundamental, porque sin él, el túnel de viento no es funcional.

El número de inventario con el cual está registrado el túnel de viento en el Centro de Investigación de Ingeniería es 8-B-467-65. De ahí se pudo investigar que este túnel de viento originalmente tenía un motor de medio caballo de fuerza (1/5 HP) y 110 voltios. El motor constaba de una polea y una faja que se conectaba hacia el ventilador ubicado dentro del túnel de viento.

El motor faltante se sustituyó con un motor de marca General Electric con modelo 5KC45NG553T. Las características del motor son las siguientes:

- Tipo de motor: A-C motor
- HP: 1
- HZ: 60
- Voltaje: 115/230
- RPM: 3450

Figura 8. **Motor**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, T-5, Facultad de Ingeniería.

Para la instalación del nuevo motor, se removieron las aspas que originalmente tenía el túnel de viento y se reemplazó por este motor debido a que ya incluye sus propias aspas.

Se le hizo una conexión con un *on/off switch* para que se pueda encender y apagar.

2.3.2. Modelos

Se observó, también, que el túnel de viento carece de los modelos para ensayar, los cuales son importantes porque con ellos se estudiaría el comportamiento de objetos expuestos a un fluido en movimiento. El aire es el fluido al que se expondrán los modelos por evaluar.

Debido a la falta de modelos para analizar, se decidió evaluar tres diferentes tipos, los cuales son:

- Placa rectangular con dimensiones: 7,5 cm X 15 cm.
- Cubo con dimensiones 8 cm.
- Cono truncado con dimensiones:
Diámetro mayor: 9 cm
Diámetro menor: 4 cm
Longitud: 11 cm

Figura 9. **Modelo: cono truncado**



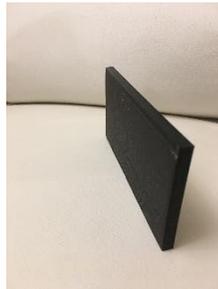
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Modelo: cubo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Modelo: placa rectangular**



Fuente: elaboración propia.

Las dimensiones de estos tres diferentes modelos se determinaron con base en diferentes ensayos para determinar las dimensiones y material apropiados para que el túnel de viento se opere. Las pruebas se realizaron con modelos hechos de vortex y duroport de diferentes tamaños. Con base en los resultados se optó por ensayar las dimensiones de los modelos con duroport, ya que fueron los que más valor mostraron en las pruebas y se podrían ver, con más facilidad, las fuerzas de arrastre y sustentación que presenta cada modelo.

Cuando se determinaron las dimensiones y peso ideal de los modelos, se optó fabricarlos de PLA (Ácido poliláctico). El PLA es un plástico biodegradable, resistente y liviano.

2.3.3. Soporte de modelos

El soporte de los modelos es una parte fundamental del túnel de viento, es donde los modelos van anclados cuando se van a ensayar. Este soporte juega un papel muy importante porque es el que transmite las fuerzas de sustentación y arrastre que percibe el modelo.

El túnel de viento actual carecía de un soporte, por lo que se decidió fabricar un soporte en el que no solo sostendría el modelo, sino que también permitiese cambiar los ángulos de ataque del flujo del viento. Esto es sumamente importante porque los modelos se deben ensayar a diferentes ángulos para estudiar su comportamiento cuando están expuestos al flujo en diferentes ángulos de ataque.

Al inicio el soporte se fabricó de hierro sólido, el cual resultó muy pesado las pruebas usando modelos hechos de duroport, arrojaban datos muy pequeños o nulos. Se determinó la necesidad de construir el soporte de un material hueco por dentro, liviano y resistente para reducir el peso. El soporte se fabricó de cobre, el cual es mucho más liviano y, al realizar la prueba, determinó su efecto favorable en la lectura de los datos de las fuerzas de arrastre y de sustentación.

Esta estructura cuenta con un tornillo de diámetro 13 mm en la parte inferior de la estructura con la cual se adapta a la balanza del túnel, recibe la

fuerza de la corriente del viento y toma la lectura de las fuerzas de arrastre y de sustentación.

En la parte superior del soporte se encuentra un pequeño anillo, donde se adaptan los brazos de los modelos cuando se van a realizar los ensayos. Los brazos de los modelos se adaptan al anillo y se aseguran con un tornillo. Estos brazos se pueden ajustar a diferentes ángulos para la evaluación de los modelos.

Figura 12. **Varilla soporte de modelos**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, T-5, Facultad de Ingeniería.

2.3.4. Escala de arrastre y de sustentación

Las placas en donde se muestran las escalas de arrastre y de sustentación en el túnel de viento se encontraban en malas condiciones. La pintura se estaba descascarando, y las escalas ya no se podían leer. Estas escalas son muy importantes debido a que es donde se toman las lecturas de las fuerzas de arrastre y de sustentación.

Dichas placas fueron desmontadas y se trazaron en papel calco. Luego fueron digitalizadas y pasadas a *photoshop* para después imprimirlas y montarlas en el equipo.

Figura 13. Escalas de arrastre y sustentación originales



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 14. **Escalas de arrastre y sustentación reparados**



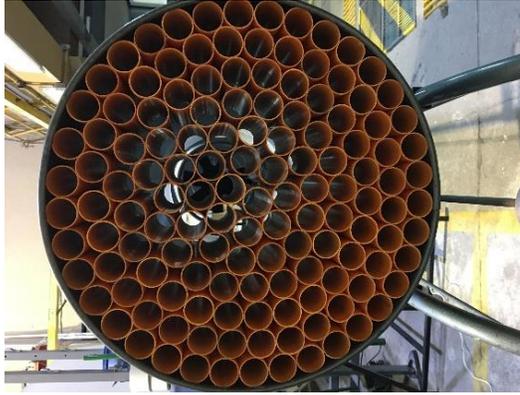
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, T-5, Facultad de Ingeniería.

2.3.5. Sección de entrada de aire

En la sección de entrada de aire se encuentran unos tubos, cuyo propósito es que el aire entre de forma rectilínea y uniforme, es decir, evitar la turbulencia del aire que fluye en el túnel de viento.

El túnel de viento carecía de dichos tubos. Se le colocaron 133 tubos PVC de 1,5 pulgadas de diámetro interior para evitar la turbulencia del aire que ingresa.

Figura 15. **Sección de entrada del aire**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, T-5, Facultad de Ingeniería.

3. INSTRUMENTACIÓN Y PUNTOS DE MEDICIÓN

3.1. Flujo alrededor de objetos

Un caso muy común en el que los objetos sumergidos fluyen entre un fluido son los barcos, aviones, submarinos, cohetes, rascacielos, entre otros. En esos casos, los objetos que se interponen al paso de los fluidos provocan pérdidas de fricción y se comportan como objetos sumergidos dentro de un fluido.

Una de las áreas más importantes del flujo en ingeniería, es el estudio de la interacción entre un flujo uniforme y un objeto sumergido. Para este tipo de flujos, nos interesa conocer qué tipo de fuerzas ejerce el flujo sobre el objeto, y una vez conocidas estas fuerzas permitirá a los diseñadores realizar mejores diseños.

En el estudio de las fuerzas que ejerce un fluido sobre un cuerpo sumergido en él, cuando existe un movimiento relativo entre los dos, sin importar cual este en reposo, el cuerpo sufre a causa de dicho movimiento dos clases de fuerzas, las fuerzas de arrastre y las fuerzas de sustentación.

A través de la experimentación se puede determinar el flujo alrededor de figuras geométricas no simples, lo cual es una técnica que sigue siendo muy ampliamente utilizada, por lo menos antes de que las técnicas computacionales se hicieran de uso común, es la experimental. Se llevan a cabo experimentos, en los cuales se coloca un cuerpo con una geometría dada en una corriente uniforme, bien caracterizada y controlada, y se mide la fuerza directamente.

Dicho experimento debe repetirse muchas veces para diferentes condiciones de flujo y se componen gráficas o tablas del coeficiente de arrastre en función de parámetros adimensionales.

3.2. Arrastre sobre cuerpos sumergidos

Todo cuerpo que esté inmerso en la corriente de un fluido estará sometido a fuerzas y momentos de fuerzas que dependen de la forma y orientación con respecto al flujo. La fuerza paralela al flujo se llama arrastre o resistencia al aire. Este arrastre tiene signo positivo cuando va en el sentido del flujo. Si un objeto ha de moverse contra el flujo deberá vencer a esta fuerza. Es importante entender que estas fuerzas son definiciones prácticas que representan el efecto de los rebotes y el deslizamiento de las partículas contra la superficie del cuerpo.

El arrastre es una fuerza mecánica que es generada por la interacción y contacto de un cuerpo rígido y un fluido, no es generada por un campo de fuerzas como en el caso de fuerzas gravitacionales o electromagnéticas donde no es necesario el contacto físico. Para que exista arrastre el cuerpo debe estar en contacto con el fluido, es decir debe haber un movimiento relativo entre el fluido y el sólido.

Por análisis dimensional se puede obtener la siguiente relación:

$$C_D = \frac{2 F_D}{\rho \cdot A \cdot v^2} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

F_D : Fuerza de arrastre (Drag) (Kg)

- C_D : Coeficiente de arrastre
- ρ : Densidad del fluido ($\frac{kg \cdot s^2}{m^4}$)
- A: Área frontal del cuerpo perpendicular a la corriente (m^2)
- v^2 : Velocidad de la corriente libre ($\frac{m}{s}$)

El coeficiente de resistencia para una geometría dada en flujo estacionario está en función del ángulo de ataque, número de Reynolds, número de Mach, número de Weber, número de Froude, velocidad de la corriente libre y temperatura de la corriente libre.

3.2.1. Coeficiente de arrastre

La geometría del sólido inmerso es un factor fundamental para determinar la cantidad de la fuerza de arrastre total ejercida sobre el cuerpo. Las correlaciones de la geometría y las características del flujo para los objetos sólidos suspendidos o mantenidos en una corriente libre (Objetos inmersos) son semejantes en concepto y forma a la correlación del factor de fricción y el número de Reynolds dada para el flujo dentro de conductos.

En el flujo a través de conductos, el factor de fricción se define como la razón entre la fuerza de arrastre por área unitaria (esfuerzo cortante) y el producto de la densidad por la carga de velocidad.

En otras palabras, el coeficiente de arrastre es el número que indica la facilidad con la que un objeto pasa a través de un fluido o bien un fluido pasa a través de un cuerpo, lo cual permite calcular la fuerza que se opone al movimiento relativo entre un cuerpo y un fluido.

Por ejemplo, el coeficiente de arrastre es la resistencia que tiene el vehículo al desplazarse. Los vehículos con mejor aerodinámica tienen menor coeficiente de arrastre.

3.2.2. Coeficiente de sustentación

La sustentación es la fuerza que el flujo ejerce sobre el cuerpo en la dirección perpendicular al flujo. Por lo general, esta dirección es la de la gravedad. El cociente de sustentación está definido como:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

A: Área proyectada del objeto frente al flujo (m^2)

F_L : Fuerza de sustentación (Lift) (Kg)

C_L : Coeficiente de sustentación

ρ : Densidad del aire ($\frac{Kg \cdot s^2}{m^4}$)

V: Velocidad del flujo de aire ($\frac{m}{s}$)

Se puede considerar que tanto el coeficiente de arrastre y el de sustentación son funciones del número de Reynolds. Además de también depender de la geometría, son funciones importantes del ángulo de ataque, este ángulo está definido como el ángulo entre la cuerda del perfil y el vector velocidad de la corriente libre.

3.3. Velocidad

La velocidad puede definirse como la cantidad de espacio recorrido por unidad de tiempo con la que un cuerpo se desplaza en una determinada dirección y sentido. La velocidad del flujo dentro del túnel de viento es uno de los parámetros que se incluyen dentro de los cálculos para poder obtener los coeficientes de arrastre y sustentación de los modelos.

La velocidad del viento dentro del túnel se mide en la cámara de ensayos. Para hacer esta medición haremos uso de un anemómetro. El anemómetro es un aparato meteorológico que se usa para medir la velocidad del viento. El número de modelo del anemómetro digital que utilizaremos es 8901-EN-00.

Figura 16. **Anemómetro digital**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, T-5, Facultad de Ingeniería.

3.3.1. Modo de operación del anemómetro

- Encender: Presionar el botón  para encender el anemómetro.
- Configurar unidad de velocidad del aire: Presionar el botón “*Unit*” y en la pantalla empezará a pestañar “m/s”. Luego con las flechas se puede elegir de las 5 diferentes unidades: m/s, km/h, knots y mph. Luego de elegir la unidad deseada se vuelve a presionar el botón “*Unit*” para confirmar la unidad deseada.
- Configurar unidad de temperatura: Se presiona el botón “°C/°F”.
- *Hold*: Al presionar el botón “*Hold*” se guarda la velocidad que se registra en ese momento, y al volverlo a presionar, el anemómetro seguirá leyendo la velocidad del aire.
- Max/Min/Avg: El botón “Max/Min/Avg” se puede presionar para que muestre la velocidad mínima, velocidad media, y velocidad máxima registrada por el anemómetro.

3.3.2. Especificaciones de las unidades de velocidad y temperatura

En las siguientes tablas se encuentran las unidades con las que el anemómetro calcula la velocidad del aire y la temperatura dentro del túnel de viento. También se puede observar el rango y la exactitud que le corresponde a cada unidad de medida del anemómetro.

Tabla II. **Velocidad del aire**

VELOCIDAD DEL AIRE		
Unidad	Rango	Exactitud
m/s	0-45	$\pm 3\% \pm 0,1$
ft/min	0-8800	$\pm 3\% \pm 10$
knots	0-88	$\pm 3\% \pm 0,1$
km/hr	0-140	$\pm 3\% \pm 0,1$
millas/hr	0-100	$\pm 3\% \pm 0,1$

Fuente: Anemómetro. *Manual*.

Tabla III. **Temperatura del aire**

TEMPERATURA		
Unidad	Rango	Exactitud
°C	0 - +45	± 2
°F	32 – 113	$\pm 3,6$

Fuente: Anemómetro. *Manual*.

3.3.3. **Medición de flujo en conductos**

Es muy importante la medición de la velocidad del aire, así como la temperatura del aire dentro del túnel de viento. Estos datos permiten conocer la densidad del aire en el momento del ensayo. Por eso, antes de ensayar los modelos, se deben tomar de estos datos, colocar la hélice del anemómetro dentro de la cámara de ensayos y asegurarse de que esté sellado para que no haya fuga de aire. Luego, se debe encender el túnel de viento para hacer correr

el aire a través de la cámara de ensayos y tomar la temperatura del aire, así como el valor máximo de la velocidad.

3.4. Presión

La presión es una magnitud física escalar que mide una proyección de fuerza ejercida de manera perpendicular sobre una unidad de superficie.

La presión puede ser clasificada según los siguientes tipos:

Absoluta. Diseñada como una medida para estandarizar la presión, se considera la carga de presión que experimenta un fluido al estar en el vacío perfecto o cero absolutos (-273,15 °C).

Atmosférica. Es aquella que ejerce el conjunto de la masa de gases de la atmósfera sobre la superficie terrestre y sobre todo lo que repose sobre ella. A medida que se eleva un cuerpo (ejemplo un globo, avión, montaña) será menor la presión ejercida al haber menos masa de aire sobre nosotros.

Manométrica. La presión medida con el vacío absoluto (presión negativa), es la presión absoluta. Si se compara contra la presión atmosférica se denomina manométrica y se calcula de la siguiente manera: presión absoluta – presión atmosférica.

Hidrostática o hidrodinámica. Es la presión experimentada por fluidos, tanto debido al peso del propio fluido en reposo (Hidrostática), como en constante movimiento (Hidrodinámica).

La presión es un factor muy importante para el túnel de viento, debido a que mide la presión en el interior de la cámara de ensayos. La presión que se encuentra en la cámara de ensayo depende directamente de la velocidad del fluido en el túnel de viento, dicha presión es utilizada para el cálculo de la densidad del fluido en el túnel de viento.

La fórmula utilizada para calcular la presión que se encuentra dentro del túnel de viento es la siguiente:

$$P = 3,39631 \times V^2 \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

P: Presión del aire dentro del túnel ($\frac{lb}{ft^2}$).

V: Velocidad del aire dentro del túnel de viento (millas/hora).

Constante: 3,39631 es el resultado de un cálculo basado en valores típicos para la densidad del aire y la aceleración gravitatoria.

4. ENSAYOS DE LOS MODELOS

4.1. Procedimiento de los ensayos

El procedimiento es el mismo para realizar los ensayos, para los tres diferentes modelos: placa rectangular, cubo y cono truncado.

- Configurar unidad de velocidad del aire: Presionar el botón “*Unit*” y en la pantalla empezará a pestañar “m/s”. Luego con las flechas se puede elegir de las 5 diferentes unidades: m/s, km/h, knots y mph. Luego de elegir la unidad deseada se vuelve a presionar el botón “*Unit*” para confirmar la unidad deseada. Se coloca el anemómetro dentro de la cámara de ensayos y se cierra asegurando que este bien sellado para que no exista fuga de aire.
- Se enciende el motor de succión de aire del túnel de viento.
- Se registra el valor de la temperatura del aire y se anota el dato.
- Se registra el valor de la velocidad del viento y se anota el dato.
- Se apaga el motor de succión para que el aire deje de fluir dentro del túnel de viento.
- Se abre la cámara de ensayos y se retira el anemómetro.
- Se coloca el soporte (La estructura de cobre) enroscándose en la balanza.
- Se coloca el modelo a ensayar en el soporte.
- Se ajusta en cero la escala de sustentación.
- Se ajusta en cero la escala de arrastre.
- Se coloca el modelo a diferentes ángulos de ataque. Primero se coloca a un ángulo de 0°.

- Se cierra la cámara de ensayos y se enciende el motor para la succión del aire.
- Se toman los valores de la fuerza de arrastre y de sustentación en libras.
- Se apaga el motor y se abre la cámara de ensayos.
- Se cambian el ángulo de ataque del modelo a un ángulo mayor a 0°.
- Se repiten los pasos 9, 10, 12, 13 y 14 en ese orden.
- Se cambia el ángulo de ataque del modelo a un ángulo menor a 0°.
- Se repiten los pasos 9, 10, 12, 13 y 14.

4.2. Toma de datos

Los datos que fueron tomados luego de ensayar los 3 diferentes modelos son:

Temperatura = 23 °C

Velocidad del viento = 9,4 m/s = 21,03 millas/hora

Tabla IV. **Fuerza de arrastre y sustentación de un cubo**

Cubo = 8 cm X 8 cm				
Ángulo de ataque (Grados)	Fuerza sustentación		Fuerza arrastre	
	lbs	Kg	lbs	kg
0	0	0	0,13	0,059
20	-0,04	-0,018	0,15	0,068
-10	-0,08	-0,036	0,13	0,059

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla V. **Fuerza de arrastre y sustentación de una placa rectangular**

Placa rectangular = 7,5 X 15 cm				
Ángulo de ataque (Grados)	Fuerza sustentación		Fuerza arrastre	
	Lbs	kg	lbs	kg
0	-0,08	-0,036	0,26	0,118
20	-0,12	-0,054	0,17	0,077
-20	0,08	0,036	0,2	0,091

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla VI. **Fuerza de arrastre y sustentación de un cono**

Cono: Diámetro = 9 cm				
Ángulo de ataque (Grados)	Fuerza sustentación		Fuerza arrastre	
	lbs	kg	lbs	Kg
0	-0,04	-0,018	0,13	0,059
25	-0,08	-0,036	0,05	0,023
-25	0,02	0,009	0,05	0,023

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

4.3. Cálculos realizados

A continuación, se calculan los coeficientes de arrastre y de sustentación de los 3 modelos ensayados previamente con el túnel de viento.

4.3.1. Cálculo de presión del viento

Presión del viento:

$$P = 3,39631 \times V^2 \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$P = 3,39631 \times (21,03 \text{ MPH})^2$$

$$P = 1\,502,055 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$$

Convertir presión de viento en unidades g/cm^2 : $733,4 \text{ g/cm}^2$

4.3.2. Cálculo de densidad del viento

$$\rho = \frac{P}{RTg} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$\rho = \frac{733,4}{29,3 \times 296,15 \times 9,81}$$

$$\rho = 0,008615 \frac{\text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$$

4.3.3. Cálculo para el cubo

En esta sección procederemos a hacer el cálculo para el modelo del cubo para poder obtener los coeficientes de arrastre y de sustentación.

4.3.3.1. Cálculo de área

Área proyectada del cubo frente al flujo:

$$A = a \cdot a \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$A = 8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$$

$$A = 64 \text{ cm}^2$$

$$A = 0,0064 \text{ m}^2$$

4.3.3.2. Coeficiente de arrastre para el cubo

$$C_D = \frac{2 F_D}{\rho \cdot A \cdot v^2} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Coeficiente de arrastre en un ángulo de ataque de 0°:

$$C_D @ 0^\circ = \frac{2 \times 0,059}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_D @ 0^\circ = 24,22$$

Coeficiente de arrastre en un ángulo de ataque de 20°:

$$C_D @ 20^\circ = \frac{2 \times 0,068}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_D @ 20^\circ = 27,92$$

Coeficiente de arrastre en un ángulo de ataque de -10°:

$$C_D @ -10^\circ = \frac{2 \times 0,059}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_D @ -10^\circ = 24,22$$

4.3.3.3. Coeficiente de sustentación para el cubo

$$C_L = \frac{2 F_L}{\rho \cdot A \cdot v^2} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Coeficiente de sustentación en un ángulo de ataque de 0°:

$$C_L @ 0^\circ = \frac{2 \times 0}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_L @ 0^\circ = 0$$

Coeficiente de sustentación en un ángulo de ataque de 20°:

$$C_L @ 20^\circ = \frac{2 \times 0,018}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_L @ 20^\circ = 7,39$$

Coeficiente de sustentación en un ángulo de ataque de -10°:

$$C_L @ -10^\circ = \frac{2 \times 0,036}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_L @ -10^\circ = 14,78$$

4.3.4. Cálculo para la placa rectangular

En esta sección procederemos a hacer el cálculo para el modelo de la placa rectangular para poder obtener los coeficientes de arrastre y de sustentación.

4.3.4.1. Cálculo de área para la placa rectangular

Área proyectada de la placa rectangular frente al flujo:

$$A = b \cdot h \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$A = 7,5 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$$

$$A = 112,5 \text{ cm}^2$$

$$A = 0,01125 \text{ m}^2$$

4.3.4.2. Coeficiente de arrastre para la placa rectangular

$$C_D = \frac{2 F_D}{\rho \cdot A \cdot v^2} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Coeficiente de arrastre en un ángulo de ataque de 0°:

$$C_D @ 0^\circ = \frac{2 \times 0,118}{0,008615 \times 0,01125 \times 9,4^2}$$

$$C_D @ 0^\circ = 27,56$$

Coeficiente de arrastre en un ángulo de ataque de 20°:

$$C_D @ 20^\circ = \frac{2 \times 0,077}{0,008615 \times 0,01125 \times 9,4^2}$$

$$C_D @ 20^\circ = 17,98$$

Coeficiente de arrastre en un ángulo de ataque de -20°:

$$C_D @ -20^\circ = \frac{2 \times 0,091}{0,008615 \times 0,01125 \times 9,4^2}$$

$$C_D @ -20^\circ = 21,25$$

4.3.4.3. Coeficiente de sustentación para la placa rectangular

$$C_L = \frac{2 F_L}{\rho \cdot A \cdot v^2} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Coeficiente de sustentación en un ángulo de ataque de 0°:

$$C_L @ 0^\circ = \frac{2 \times 0,036}{0,008615 \times 0,01125 \times 9,4^2}$$

$$C_L @ 0^\circ = 8,41$$

Coeficiente de sustentación en un ángulo de ataque de 20°:

$$C_L @ 20^\circ = \frac{2 \times 0,054}{0,008615 \times 0,01125 \times 9,4^2}$$

$$C_L @ 20^\circ = 12,61$$

Coeficiente de sustentación en un ángulo de ataque de -20°:

$$C_L @ -20^\circ = \frac{2 \times 0,036}{0,008615 \times 0,01125 \times 9,4^2}$$

$$C_L @ -20^\circ = 8,41$$

4.3.5. Cálculo para el cono

En esta sección procederemos a hacer el cálculo para el modelo del cono para poder obtener los coeficientes de arrastre y de sustentación.

4.3.5.1. Cálculo de área para el cono

Área proyectada del cono frente al flujo:

$$A = \pi r^2 \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$A = \pi 4,5^2$$

$$A = 63,617 \text{ cm}^2$$

$$A = 0,0064 \text{ m}^2$$

4.3.5.2. Coeficiente de arrastre para el cono

$$C_D = \frac{2 F_D}{\rho \cdot A \cdot v^2} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Coeficiente de arrastre en un ángulo de ataque de 0° :

$$C_D @ 0^\circ = \frac{2 \times 0,059}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_D @ 0^\circ = 2,42$$

Coeficiente de arrastre en un ángulo de ataque de 25°:

$$C_D @ 25^\circ = \frac{2 \times 0,023}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_D @ 25^\circ = 0,94$$

Coeficiente de arrastre en un ángulo de ataque de -25°:

$$C_D @ -25^\circ = \frac{2 \times 0,023}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_D @ -25^\circ = 0,94$$

4.3.5.3. Coeficiente de sustentación para el cubo

$$C_L = \frac{2 F_L}{\rho \cdot A \cdot v^2} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Coeficiente de sustentación en un ángulo de ataque de 0°:

$$C_L @ 0^\circ = \frac{2 \times 0,018}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_L @ 0^\circ = 0,74$$

Coeficiente de sustentación en un ángulo de ataque de 25°:

$$C_L @ 25^\circ = \frac{2 \times 0,036}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_L @ 25^\circ = 1,48$$

Coeficiente de sustentación en un ángulo de ataque de -25° :

$$C_L @ -25^\circ = \frac{2 \times 0,009}{0,008615 \times 0,0064 \times 9,4^2}$$

$$C_L @ -25^\circ = 0,37$$

4.4. Tabulación de resultados

Luego de realizar los cálculos respectivos se debe proceder a la tabulación de los datos para poder hacer un mejor análisis de los mismos.

4.4.1. Cubo

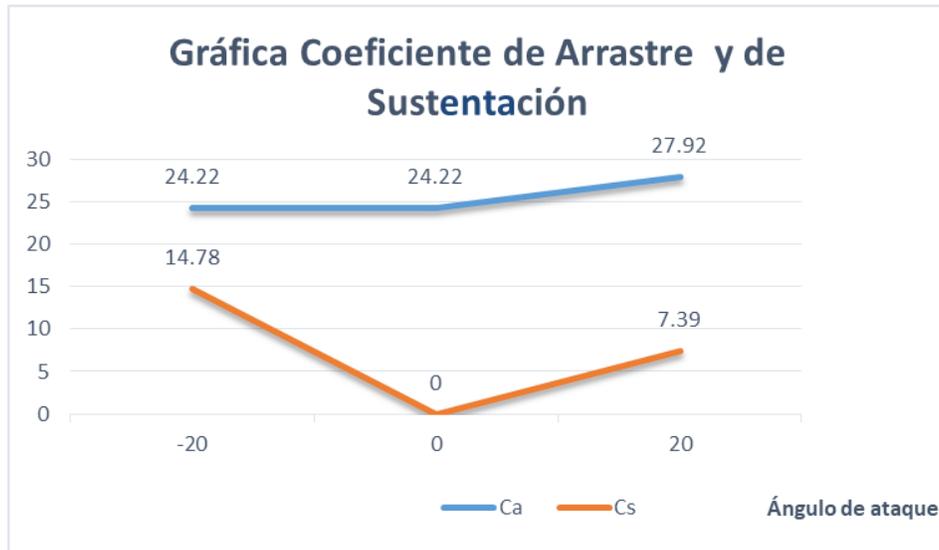
Se tabulan los datos obtenidos al calcular los coeficientes de arrastre y de sustentación del cubo.

Tabla VII. **Resultados obtenidos del cubo**

Ángulo (°)	Fd (kg)	Cd	FL (kg)	CL
0	0,059	24,22	0	0
20	0,068	27,92	0,018	7,39
-20	0,059	24,22	0,036	14,78

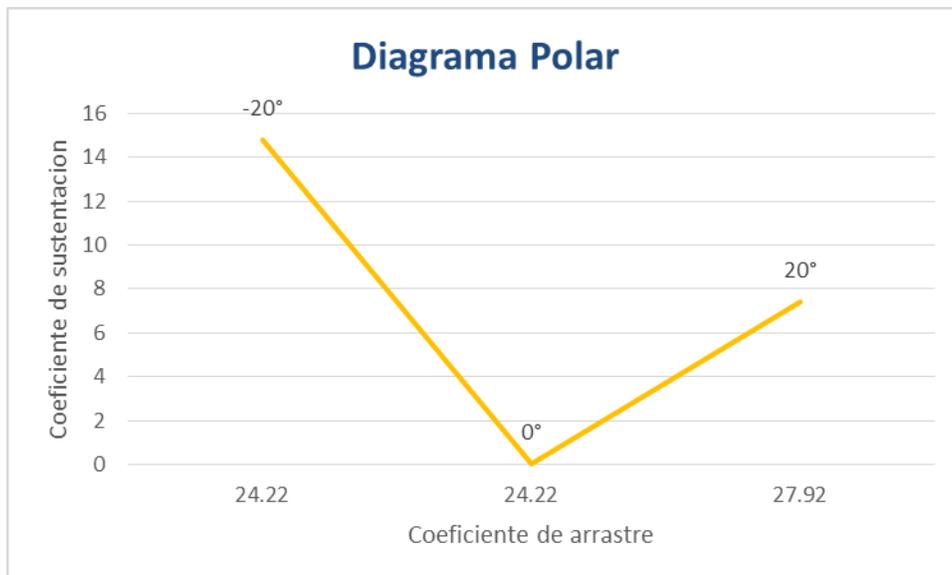
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 17. **Gráfica coeficiente de arrastre y de sustentación de un cubo**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 18. **Diagrama polar del cubo**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

4.4.2. Placa rectangular

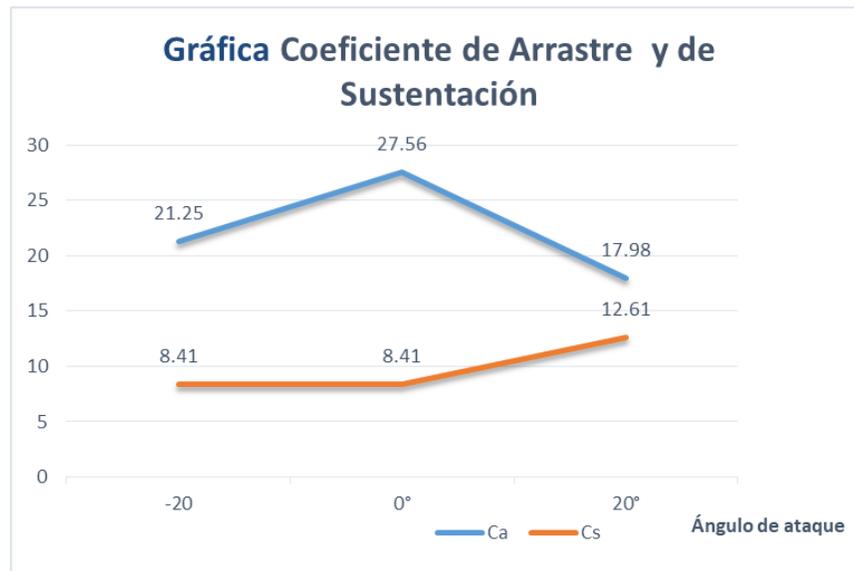
Se tabulan los datos obtenidos al calcular los coeficientes de arrastre y de sustentación de la placa rectangular.

Tabla VIII. Resultados obtenidos de la placa rectangular

Ángulo (°)	Fd (kg)	Cd	FL (kg)	CL
0	0,118	27,56	0,036	8,41
20	0,077	17,98	0,054	12,61
-20	0,091	21,25	0,036	8,41

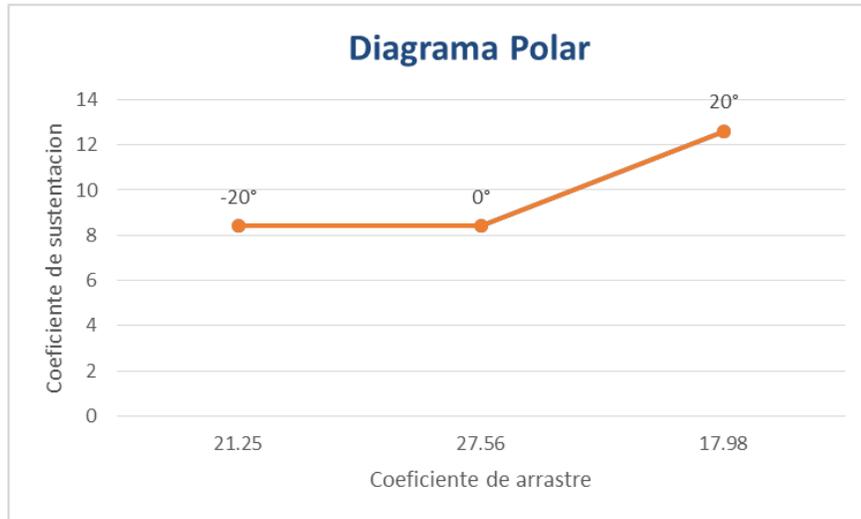
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 19. Gráfica cd y cl de una placa rectangular



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 20. **Diagrama polar de una placa rectangular**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

4.4.3. **Cono**

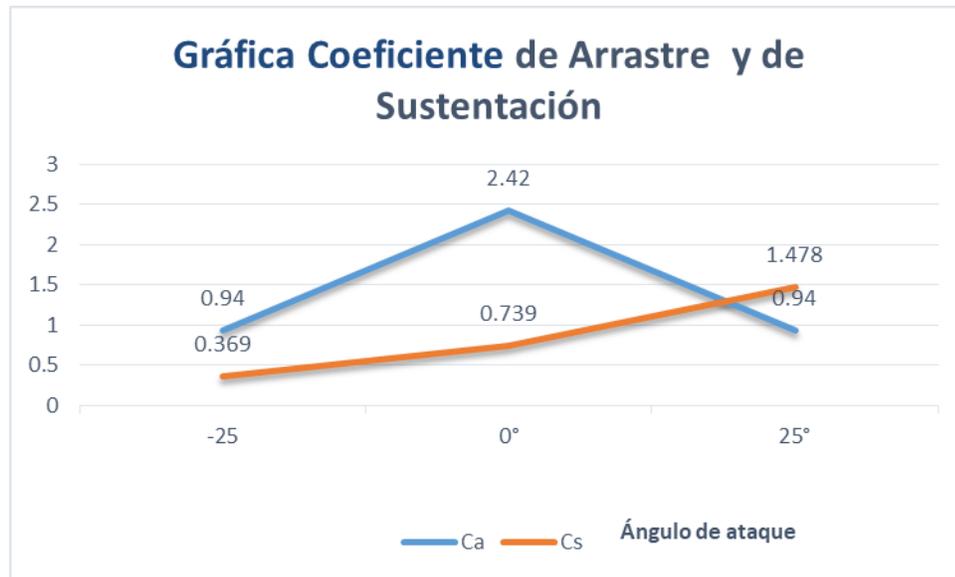
Se tabulan los datos obtenidos al calcular los coeficientes de arrastre y de sustentación del cono.

Tabla IX. **Resultados obtenidos del cono**

Ángulo (°)	Fd (kg)	Cd	FL (kg)	CL
0	0,059	2,42	0,018	0,739
25	0,023	0,94	0,036	1,478
-25	0,023	0,94	0,009	0,369

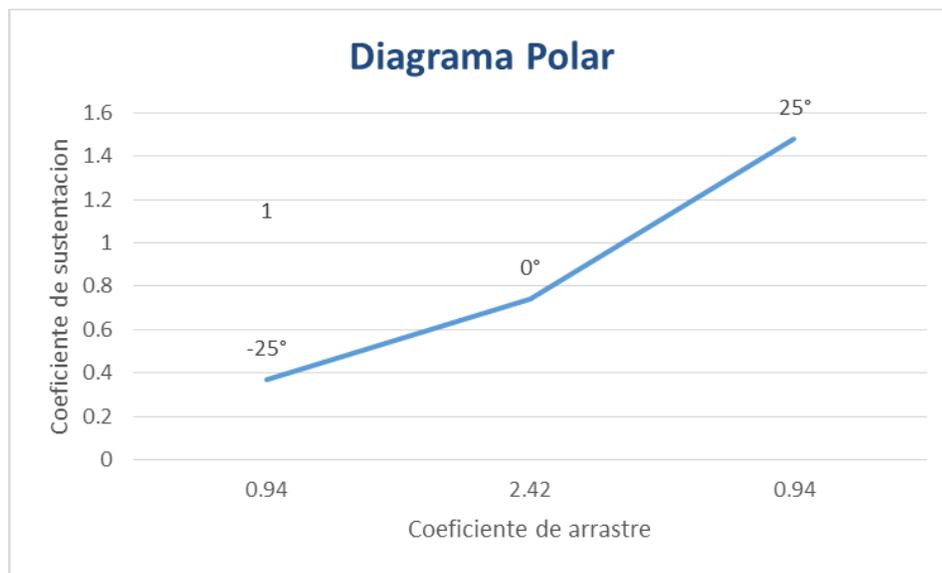
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 21. **Gráfica coeficiente de arrastre y de sustentación de un cono**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 22. **Diagrama polar de un cono**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

4.5. Interpretación de resultados

Se procede a la interpretación de resultados luego de haber tabulado y graficado los datos obtenidos.

4.5.1. Cubo

Se llevó a cabo el ensayo del cubo en el túnel de viento y, luego de realizar los cálculos se comparan los resultados de los coeficientes de arrastre y de sustentación, a diferentes ángulos de ataque. Dicha comparación se puede hacer tomando en cuenta la tabla VI, donde se encuentran los valores de coeficientes de arrastre y de sustentación obtenidos ensayando a diferentes ángulos de ataque.

Se puede observar que a un ángulo de 0° el coeficiente de arrastre es de 24,22. Este coeficiente se considera elevado, lo que significa que, a este ángulo, el cubo se opuso al flujo del fluido. Y el coeficiente de sustentación a ese mismo ángulo es de 0, el cual se considera que es un coeficiente muy bajo.

Para un ángulo de ataque de $+20^\circ$, el coeficiente de arrastre es aún más elevado que para un ángulo de 0° . Se nota que el coeficiente de sustentación también es más alto que para el ángulo de 0° . El coeficiente de arrastre para este ángulo es de 27,92 y el coeficiente de sustentación es de 7,39.

Al analizar los coeficientes de sustentación y de arrastre a un ángulo de -20° , se observa que el coeficiente de arrastre es igual al obtenido con un ángulo de ataque de 0° y el coeficiente de sustentación es más elevado que los obtenidos con ángulos de ataque 0° y $+20^\circ$. El coeficiente de arrastre a este ángulo es de 24,22 y el coeficiente de sustentación es de 14,78.

Para que un elemento se considere aerodinámico, su coeficiente de arrastre debe ser lo más bajo posible porque, si es elevado, indica que este se opone al flujo de fluido. El coeficiente de sustentación también debe ser elevado el modelo pueda ser favorable para la aerodinámica.

Para este modelo son más favorables los resultados obtenidos a un ángulo de ataque de -20° , sin embargo, dichos resultados no son los mejores para que el cubo ensayado pueda ser considerado como un buen modelo aerodinámico. Esto se debe a que el coeficiente de arrastre debería ser mucho menor (0,20 – 0,30) para que sea favorable para la aerodinámica.

Cuando se analizan las figuras 15 y 16: Gráfica de coeficiente de arrastre y sustentación vs. ángulo de ataque y diagrama polar respectivamente, se observa que el cubo no es aerodinámico. Esto se demuestra porque no sigue con el patrón de las gráficas del perfil alar, figuras 4 y 5. Esta comparación obedece a que el perfil alar es un modelo altamente aerodinámico.

En la figura 4 se observa que, tanto el coeficiente de arrastre como el de sustentación aumentan con el ángulo de ataque. Mientras que en la figura 15 el coeficiente de sustentación no aumenta conforme el ángulo de ataque.

Figura 23. **Cubo colocado en el túnel de viento**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, T-5, Facultad de Ingeniería.

4.5.2. Placa rectangular

En los resultados después de ensayar la placa rectangular se observa que a un ángulo de ataque de 0° , tanto el coeficiente de arrastre como el de sustentación son elevados, 27,56 y 8,41 respectivamente.

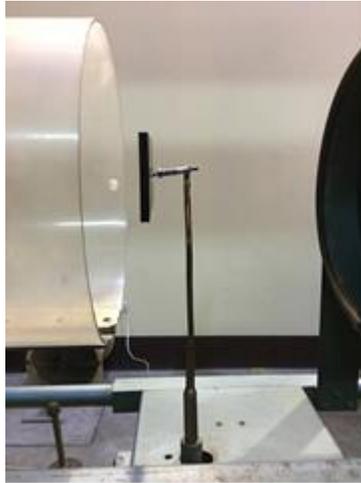
A un ángulo de $+20^\circ$ el coeficiente de arrastre disminuye con respecto al obtenido con un ángulo de ataque de 0° y el coeficiente de sustentación aumenta. El coeficiente de sustentación a dicho ángulo de ataque es de 17,98, y el coeficiente de arrastre es de 12,61.

Al evaluar el coeficiente de arrastre a un ángulo de -20° se obtuvo, un valor de 21,25 y para el coeficiente de sustentación un valor de 8,41.

Con estos valores se determinó que una placa rectangular no se puede considerar como aerodinámica.

Esto se debe a que los valores de coeficientes de arrastre son muy elevados, lo cual indica que este modelo se opone significativamente a la corriente del fluido y para que un modelo pueda ser bueno para la aerodinámica, el coeficiente de arrastre debe ser un valor bajo (entre 0,20 – 0,30).

Figura 24. **Placa rectangular colocada en el túnel de viento**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, T-5, Facultad de Ingeniería.

En las figuras 17 y 18, se observa que la placa rectangular no es aerodinámica. Esto se deduce si se compara con las figuras 4 y 5 ya que esas le corresponden a la del perfil alar. Según esta comparación, las gráficas de la placa rectangular no siguen con el patrón de las gráficas del perfil alar. Esta comparación es necesaria puesto que el perfil alar es un modelo altamente aerodinámico.

Esta comparación permite observar que el coeficiente de arrastre de la placa rectangular sigue una tendencia diferente a la del perfil alar, es decir, el arrastre de la placa rectangular no va en aumento con el ángulo de ataque.

4.5.3. Cono truncado

Luego de ensayar el cono en el túnel de viento y realizar los cálculos, se obtuvieron los coeficientes de arrastre y de sustentación a diferentes ángulos de ataque.

Para un ángulo de ataque de 0° el coeficiente de arrastre es de 2,42, y el coeficiente de sustentación es de 0,739. Se determina que el coeficiente de arrastre es elevado y que el coeficiente de sustentación es bajo para este ángulo de ataque.

El análisis del ángulo de ataque de $+25^\circ$ indica que el coeficiente de arrastre es de 0,94 y el coeficiente de sustentación es de 1,48. Este coeficiente de arrastre es bajo y que el coeficiente de sustentación es alto, lo cual es favorable para el análisis de la aerodinámica de cuerpos sumergidos en un fluido.

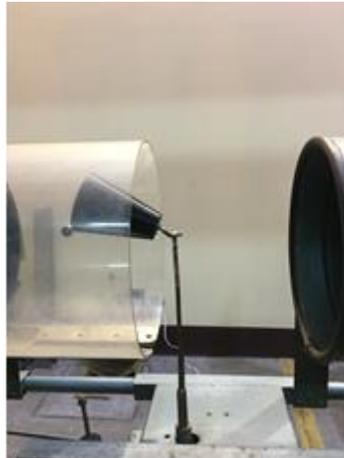
De acuerdo con el análisis se puede asegurar que, cuando el ángulo de ataque fue de -25° el coeficiente de arrastre fue de 0,94 lo cual es favorable, pero el coeficiente de sustentación también obtuvo un valor bajo el cual es de 0,369. El coeficiente de sustentación en este caso no es favorable debido a que es un valor muy bajo, y esto es interpretado como una oposición del modelo contra la corriente del fluido, el cual hace que dicho modelo no se considere como aerodinámico a este ángulo de ataque.

Las figuras 19 y 20, corresponden al comportamiento del cono, en ellas se observa que el cono no es aerodinámico. Esto se deduce porque que el comportamiento del arrastre no sigue un patrón similar al de las gráficas del

perfil alar, figuras 4 y 5. Debería ir en aumento conforme aumenta el ángulo de ataque.

Según la discusión anterior, esta comparación es importante porque el perfil alar es un modelo aerodinámico.

Figura 25. **Cono colocado en el túnel de viento**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, T-5, Facultad de Ingeniería.

4.5.4. Comparación de resultados entre los 3 modelos ensayados

Se comparan entre sí los resultados de los 3 modelos distintos, ello permitió determinar que el modelo que más favoreció la aerodinámica fue el cono.

Esto se determinó en función de los resultados obtenidos del coeficiente de arrastre (C_d) y sustentación (C_L) a un ángulo de $+25^\circ$. El C_d obtenido para el cono truncado fue el menor de los tres modelos ensayados (0,94).

Como se indicó antes, un valor de C_d bajo significa que el modelo opuso menos resistencia hacia la corriente de fluido, es decir, es el modelo más aerodinámico. Es conveniente señalar que, aunque este valor es más bajo que los otros modelos ensayados, aún no está dentro del rango aceptable (0,20 – 0,30) para poder ser considerado como un objeto aerodinámico.

A su vez también podemos ver que el valor de C_L (1,48) es un valor aceptable y dentro del rango (1,25 – 1,50). Y si solo se analizara este modelo únicamente con el valor de C_L se pudiera decir que es aerodinámico ya que está dentro del rango aceptable.

No obstante, el cono no puede ser considerado como un objeto aerodinámico, aunque es el modelo que demostró el mejor comportamiento entre los 3 ensayados.

4.6. Instructivo de laboratorio

FACULTAD DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MECANICA DE FLUIDOS
LABORATORIO NO. ___
COEFICIENTES DE RESISTENCIA AL AVANCE

Objetivos

General:

- Determinar experimentalmente los coeficientes de resistencia al avance de diferentes cuerpos.

Específicos:

- Obtener la velocidad y la presión en el interior del túnel de viento.

- Obtener la fuerza de arrastre y de sustentación para los 3 modelos.

Introducción

En esta práctica determinaremos las fuerzas de arrastre y sustentación a las que están sujetas diferentes modelos con diferentes geometrías, al ser sometidas a un flujo constante de aire, dentro del túnel de viento.

Marco teórico

Las fuerzas de arrastre y de sustentación dependen de la densidad del fluido, la velocidad del fluido contra corriente y las dimensiones, la forma y la orientación del cuerpo.

La fuerza de un fluido en movimiento que se ejerce sobre un cuerpo en la dirección del fluido es llamado arrastre. La fuerza de arrastre puede ser medida directamente por la atracción del cuerpo sujeto al fluido.

La sustentación es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la velocidad de la corriente del fluido.

El coeficiente de arrastre C_D y coeficiente de sustentación C_L están definidos como:

$$C_D = \frac{2 F_D}{\rho \cdot A \cdot v^2} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$C_L = \frac{2 F_L}{\rho \cdot A \cdot v^2} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

A: Área proyectada del objeto frente al flujo (m^2)

F_L : Fuerza de sustentación (Lift) (Kg)

C_L : Coeficiente de sustentación

ρ : Densidad del aire ($\frac{Kg.s^2}{m^4}$)

V: Velocidad del flujo de aire ($\frac{m}{s}$)

Modelos por utilizar

Cubo 8 cm x 8 cm.

Placa rectangular 7,5 cm x 15 cm.

Cono truncado: Diámetro mayor 9 cm y diámetro menor 4 cm.

Procedimiento

- Se coloca el anemómetro dentro de la cámara de ensayos y se cierra asegurando que este bien sellado para que no exista fuga de aire.
- Se enciende el motor de succión de aire del túnel de viento.
- Se registra el valor de la temperatura del aire, y se anota el dato.
- Se registra el valor de la velocidad del viento, y se anota el dato.
- Se apaga el motor de succión para que el aire deje de fluir dentro del túnel de viento.
- Se abre la cámara de ensayos y se retira el anemómetro.
- Se coloca el soporte (La estructura de cobre) enroscándose en la balanza.
- Se coloca el modelo a ensayar en el soporte.
- Se ajusta en cero la escala de sustentación.

- Se ajusta en cero la escala de arrastre.
- Se coloca el modelo a diferentes ángulos de ataque. Primero se coloca a un ángulo de 0°.
- Se cierra la cámara de ensayos y se enciende el motor para la succión del aire.
- Se toman los valores de la fuerza de arrastre y de sustentación en libras.
- Se apaga el motor y se abre la cámara de ensayos.
- Se cambian el ángulo de ataque del modelo a un ángulo mayor a 0°.
- Se repiten los pasos 9, 10, 12, 13 y 14 en ese orden.
- Se cambia el ángulo de ataque del modelo a un ángulo menor a 0°.
- Se repiten los pasos 9, 10, 12, 13 y 14.

Toma de datos

Tabla X. **Temperatura y velocidad del aire**

Temperatura del aire	
Velocidad del aire	

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XI. **Toma de datos del cubo**

Cubo = 8 cm X 8 cm				
Ángulo de ataque (Grados)	Fuerza Lift		Fuerza Drag	
	lbs	kg	lbs	kg
0				
20				
-10				

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XII. **Toma de datos de la placa rectangular**

Placa rectangular = 7,5 X 15 cm				
Ángulo de ataque (Grados)	Fuerza Lift		Fuerza Drag	
	lbs	kg	lbs	kg
0				
20				
-20				

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XIII. Toma de datos del cono

Cono: Diámetro = 9 cm				
Ángulo de ataque (Grados)	Fuerza Lift		Fuerza Drag	
	Lbs	kg	lbs	kg
0				
25				
-25				

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

CONCLUSIONES

1. El túnel de viento del laboratorio de mecánica de fluidos fue evaluado y rehabilitado. Se llevaron a cabo los siguientes arreglos: instalación de un motor y sus accesorios correspondientes, creación de nuevos modelos y un nuevo soporte para sustentar dichos modelos durante los ensayos debido a que el túnel carecía de estos. Se rehabilitó la sección de entrada de aire, ya que las piezas existentes estaban en un estado deteriorado debido al paso del tiempo y se adquirió un anemómetro digital para facilitar la medición de la velocidad del fluido dentro del túnel. Esta modificación se llevó a cabo para el uso de los estudiantes de mecánica de fluidos, debido a que de esta manera ellos podrán tener conocimientos básicos del comportamiento de cuerpos sólidos sumergidos en fluidos y aerodinámica básica.
2. Se llevó a cabo el diagnóstico del túnel de viento que se encuentra en el laboratorio de mecánica de fluidos y se pudo determinar que había partes faltantes y mejoras que se podrían hacer al equipo. Las partes faltantes son los modelos por ensayar, la varilla de soporte, el motor y el anemómetro. Los modelos fueron elaborados de un plástico llamado PLA (ácido poliáctico), el cual es un plástico biodegradable, resistente y liviano el cual fue una ventaja debido a que se necesita que los modelos sean muy livianos para que su peso no sea un factor que afecte a la fuerza del viento a la que estará expuesto. La varilla de soporte fue elaborada de cobre debido a que es un metal muy liviano. Se utilizó un motor de 1 caballo de fuerza y 3 450 revoluciones por minuto. El

reemplazo de estos accesorios por piezas permite que el túnel sea funcional para realizar los ensayos de aerodinámica.

3. Los componentes de medición del túnel de viento fueron restaurados. Las escalas de medición de arrastre y sustentación fueron evaluadas y restauradas. La escala de medición de arrastre mide la fuerza en eje “x” que ejerce el viento en el modelo. De igual forma, la escala de medición de sustentación mide la fuerza en eje “y” que ejerce el viento sobre el modelo. Dicha fuerza se mide en libras. El tablero de piezómetro es otro componente de medición restaurado. Dicho tablero mide la presión que es ejercido en el túnel por la corriente de viento. Este tablero consta de 50 mangueras de PVC transparente con capacidad de soportar una presión interna de 50 PSI. Las mejoras se realizaron para que la medición en los ensayos sea efectiva

4. Se ensayaron los 3 modelos diferentes en el túnel de viento y se calcularon sus coeficientes de arrastre y de sustentación. Luego de la obtención de datos se graficó y se verificó que ninguno de los modelos es aerodinámico ya que no cumplen con los valores de los coeficientes de sustentación y de arrastre. Aunque el cono truncado no se puede considerar como un modelo aerodinámico puesto que el comportamiento del arrastre no sigue con un patrón similar al de las gráficas del perfil alar, el cual debería ir en aumento conforme aumenta el ángulo de ataque, se puede concluir que el cono truncado es el modelo más aerodinámico de los 3 modelos evaluados debido a que haciendo la comparación, fue el modelo que presento un coeficiente de arrastre más bajo y un coeficiente de sustentación dentro del rango

5. Se elaboró un instructivo de laboratorio para el uso de los estudiantes de mecánica de fluidos, que servirá como guía del procedimiento que se lleva a cabo al ensayar los 3 modelos, los cuales serían, la placa rectangular, el cono truncado, y el cubo. El instructivo comprende de un pequeño resumen de las fuerzas de arrastre y las fuerzas de sustentación, así como las respectivas fórmulas por utilizar para calcular los coeficientes de arrastre y de sustentación. También se describen las dimensiones de cada modelo que se utilizará en el ensayo. Incluso se podrá encontrar en dicho instructivo, un detallado procedimiento para realizar el ensayo. También incluye las tablas para la recolección de datos después del ensayo.

RECOMENDACIONES

1. Darle el mantenimiento adecuado al túnel de viento, al transcurrir el tiempo, para que no se deteriore y se pueda seguir utilizando en el laboratorio de mecánica de fluidos. De esta manera, los futuros ingenieros adquirirán mayor conocimiento acerca de la aerodinámica.
2. Implementar, dentro del contenido del curso de mecánica de fluidos, el ensayo y estudio de figuras geométricas para determinar su comportamiento e interpretar resultados.
3. Ampliar el estudio de otras figuras geométricas en los ensayos del túnel de viento para realizar comparaciones entre los resultados de las diferentes figuras y de esa forma poder analizar su comportamiento
4. Actualizar el instructivo después de un tiempo, para que los estudiantes del laboratorio de mecánica de fluidos cuenten con la más reciente información.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMAYA CARIAS, Omri Alberto. *Revista ciencias espaciales 2016*. [en línea]. <<https://www.camjol.info/index.php/CE/issue/view/420>>. [Consulta: 15 de octubre 2019].
2. BARLOW, J., RAE, W. y POPE, A. *Low-speed wind tunnel testing*. Tercera edición. Canadá: John Wiley & Sons. 1999. p. 713.
3. MARROQUÍN BÚCARO, Héctor Alfonso. *Guía para el laboratorio de mecánica de fluidos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1969. p. 109.
4. SHERWOOD, Aaron Wiley. *Aerolab Educational wind tunnel (EWT)*. [en línea]. <<https://www.aerolab.com/products/educational-wind-tunnel-ewt/>>. [Consulta: 20 de septiembre 2018].