



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN TÚNEL DE VIENTO
DIDÁCTICO Y VALIDACIÓN CON UN PROGRAMA CFD
(Computational Fluid Dynamic).**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de
Ingeniero Mecánico Automotriz**

Autor

Ricardo Miguel Goercke León

Director

Hernán Arturo Viteri Cerda

Cuenca- Ecuador

2011

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación, dedico a mis padres y a mi familia.

RESUMEN

La construcción del Túnel de Viento Didáctico, se inicia con el estudio de la mecánica de fluidos, con el diseño de cada una de las partes en función de la geometría, las dimensiones y cálculos.

Todos los materiales seleccionados para la construcción del túnel están disponibles en el mercado local. Una vez que se desarrolló el modelo se llevaron a cabo pruebas experimentales sobre objetos colocados dentro del túnel físico con el objetivo de visualizar las líneas de flujo sobre los perfiles utilizados.

Los resultados obtenidos fueron validados con una simulación en un programa para modelación de elementos finitos, obteniéndose una congruencia aceptable.

8
290611
Bunuel

ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A WIND TUNNEL TRAINING AND VALIDATION WITH A CFD PROGRAM (Computational Fluid Dynamic).

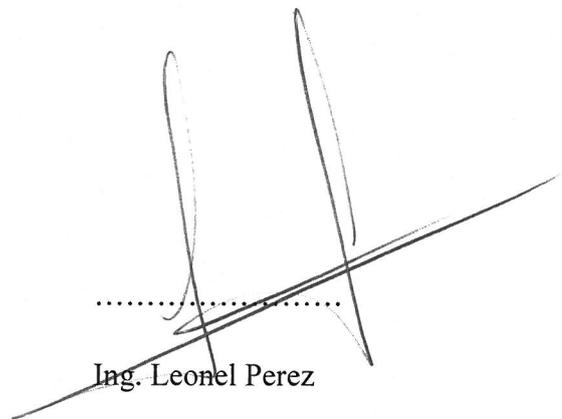
The Wind Tunnel constructions starts with an initial study over fluids mechanics. Afterward a design of all its parts is developed based on geometry, dimensions and calculus.

A fluid mechanics study was elaborated as a previous stage to the designs. The design of its components parts was based on structural modeling. All selected materials to construct the tunnel are available in the local market.

Once the model was developed, experimental tests were carried out over the physical Wind Tunnel of an object placed within it oriented to visualize fluid lines over objet profiles. Results were validated with other ones obtained upon a Finite Elements Simulation software. An acceptable range of correlation was found between both datas.

Miguel Goercke L

Miguel Goercke


.....
Ing. Leonel Perez

CONTENIDOS

Dedicatoria	ii
Resumen	iii
Abstract	vi
Índice de Contenidos	v
Índice de Tablas	vii
Índice de Ilustraciones	viii

INTRODUCCION	1
---------------------------	----------

CAPITULO I: MECANICA DE FLUIDOS

1.1 Mecánica de fluidos	3
1.2 Propiedades de los fluidos.....	3
1.2.1 Peso específico	3
1.2.2 Volumen específico	4
1.2.3 Compresibilidad	4
1.2.4 Viscosidad	5
1.2.5 Caudal volumétrico	5
1.2.6 Ecuación de la continuidad.....	6
1.3 Tipos de flujo	6
1.4 Dinámica de los fluidos.....	8
1.5 Ecuación general de la energía.....	12
1.6 Coeficientes de arrastre y sustentación	13

CAPITULO II: DISEÑO DEL TUNEL DE VIENTO

2.1 Introducción	14
------------------------	----

2.2 Dimensionado del túnel de viento.....	15
2.3 Diseño del túnel de viento.....	16
2.3.1 Entrada de humo.....	16
2.3.2 Cono de contracción.....	17
2.3.3 Sección de prueba.....	19
2.3.4 Difusor.....	20
2.3.5 Fuente de aire.....	20

CAPITULO III: CONSTRUCCION DEL TUNEL DE VIENTO

3.1 Materiales y elementos para la construcción.....	25
3.2 Construcción.....	25
3.3 Observaciones de funcionamiento.....	30

CAPITULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS DEL TUNEL DE VIENTO

4.1 Pruebas de funcionamiento experimentales.....	32
4.2 Análisis del perfil aerodinámico en el túnel de viento.....	34
4.3 Análisis en el programa CFD.....	35
4.4 Validación de resultados.....	38

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40
--	-----------

BIBLIOGRAFIA.....	41
--------------------------	-----------

ANEXOS.....	43
--------------------	-----------

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Valores del numero de Reynolds	9
Tabla 2.1: Datos de funcionamiento del extractor de aire	17
Tabla 2.2: Factor de fricción y pérdidas por rozamiento	22
Tabla 2.3: Pérdidas de presión en el Túnel de viento	22

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Cambio de sección circular.....	6
Figura 1.2: Clasificación de los tipos de flujo	7
Figura 1.3: Flujo turbulento y laminar	8
Figura 1.4: Sección transversal no circular	10
Figura 1.5: El número de Reynolds y su influencia en la capa límite.....	11
Figura 1.6: Coeficiente de arrastre respecto al número de Reynolds.....	11
Figura 2.1: Funcionamiento del túnel de viento.....	14
Figura 2.2: Movimiento de partículas	15
Figura 2.3: Túnel de viento abierto	15
Figura 2.4: Esquema del Túnel de viento	16
Figura 2.5: Máquina de niebla	17
Figura 2.6: Puntos de análisis.....	18
Figura 2.7: Coeficiente de arrastre respecto al número de Reynolds.....	20
Figura 2.8: Diagrama esquemático del control de velocidad.....	21
Figura 2.9: Esquema 3d del Túnel de viento.....	23
Figura 3.1: Materiales para la construcción	25
Figura 3.2: Poliéster	25
Figura 3.3: Cortes de fibra de vidrio	26
Figura 3.4: Cono de contracción	26
Figura 3.5: Cono de contracción	27
Figura 3.6: Estructura de apoyo	27
Figura 3.7: Soportes de aluminio	28
Figura 3.8: Difusor	28
Figura 3.9: Vista final del difusor	28
Figura 3.10: Soporte del ventilador.....	29

Figura 3.11: Apoyos.....	29
Figura 3.12: Soporte de madera	29
Figura 3.13: Cono de unión.....	30
Figura 3.14: División y salida de humo	30
Figura 3.15: Maqueta	30
Figura 4.1: Vehículos a escala	32
Figura 4.2: Esfera	33
Figura 4.3: Perfil aerodinámico.....	33
Figura 4.4: Foto vehículo	34
Figura 4.5: Foto perfil	34
Figura 4.6: Estudio del perfil aerodinámico.....	35
Figura 4.7: Cámara de estudio y perfil aerodinámico	35
Figura 4.8: Mallado del perfil aerodinámico.....	36
Figura 4.9: Calidad de mallado	36
Figura 4.10: Variables de estudio.....	37
Figura 4.11: Unidades	37
Figura 4.12: Resultado del estudio en el programa Fluent	38
Figura 4.13: Comparación de resultados.....	39

Goercke León Ricardo Miguel

Trabajo de Graduación

Ing. Hernán Viteri

Junio del 2011

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN TÚNEL DE VIENTO DIDÁCTICO Y VALIDACIÓN CON UN PROGRAMA CFD (Computational Fluid Dynamic).

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DIDÁCTICO Y VALIDACIÓN CON UN PROGRAMA CFD”, ha surgido principalmente de la necesidad de implementar una maqueta que facilite el estudio de la mecánica de fluidos. El proyecto tiene como objetivo general, diseñar y construir un Túnel de Viento Didáctico y su validación por medio de un programa CFD (Computational fluid dynamic). Además; seleccionar los equipos más adecuados para la construcción del Túnel de Viento, diseñar y construir un perfil aerodinámico en el Túnel de Viento y en el programa CFD, validar los resultados obtenidos del Túnel de Viento con el realizado en un programa CFD. Durante el desarrollo y ejecución del proyecto se ha tomado como referencia los trabajos y las investigaciones sobre el campo de la aerodinámica, originariamente, realizados por investigadores de *LEGO Data Acquisition and Prototyping System, NASA Learning Technologies Program*, ya que es un diseño fácil de implementar, por su agilidad en el manejo didáctico, por la posibilidad de comprobar su funcionamiento y los resultados obtenidos, a través de un programa CFD.

La metodología utilizada, inicio con la investigación sobre los conceptos relacionados con los fluidos, los mismos que han servido de base para la construcción del túnel de viento. La segunda fase tiene que ver con la elaboración del diseño de cada una de las partes del túnel de viento, los cálculos matemáticos sobre las dimensiones y los materiales a utilizarse en su construcción. El tercer capítulo es el experimental porque se ha construido el túnel de viento didáctico; por

último se puede constatar el correcto funcionamiento del túnel de viento y los resultados que hemos deducido de la investigación en el cuarto capítulo.

Finalmente, se considera que este proyecto tiene utilidad en la medida en que servirá a los futuros estudiantes, para continuar y profundizar el conocimiento de la aerodinámica y su aplicación en los automóviles.

CAPITULO I

MECÁNICA DE FLUIDOS

1.1 Mecánica de fluidos

Un fluido es una sustancia que se deforma de manera continua cuando se ejerce un esfuerzo cortante de cualquier magnitud. Es un campo de la ciencia que estudia los fluidos incompresibles en reposo o en movimiento.

La mecánica de fluidos es importante ya que explica por qué los aviones tienen una forma aerodinámica y superficies lisas logrando así vuelos perfectos. Las aplicaciones son infinitas, siendo un tema práctico muy importante; uno de los cuales es la aerodinámica aplicada a vehículos y aviones. El automóvil ha tenido un cambio tecnológico a través de los tiempos en el cual, la aerodinámica forma un papel fundamental para lograr una mayor velocidad y menor consumo de combustible.

Los gases como el aire, oxígeno, poseen espacios moleculares muy grandes comparados con la estructura molecular de un sólido; los gases se deforman y comprimen fácilmente por las fuerzas intermoleculares que son muy pequeñas.

1.2 Propiedades de los fluidos

1.2.1 Peso específico

El peso específico se define como su peso por unidad de volumen, indicando el peso del sistema; se relaciona con la densidad por medio de la siguiente ecuación:

$$\gamma = \delta g \quad (1-1)$$

Donde:

δ – Densidad (kg/m^3)

g – Gravedad (9.8 m/s^2)

La densidad, el peso específico y la densidad relativa están interrelacionados entre sí, y a partir de cada uno de ellos se puede calcular los demás.

1.2.2 Volumen específico

Es el volumen ocupado por la unidad de masa. Es la inversa de la densidad.

$$v = \frac{1}{\delta} \quad (1-2)$$

Donde:

d – densidad (kg/m^3)

1.2.3 Compresibilidad

Los líquidos en su mayoría son incompresibles; pero cuando se produce un cambio de presión grande o muy rápido; el fluido puede cambiar; el volumen (por lo tanto la densidad). La siguiente fórmula se utiliza para calcular el módulo de elasticidad volumétrico.

$$E_v = \frac{dp}{dv/v} \quad (1-3)$$

Donde:

dp – Variación de presión

dv – Variación de volumen

v – volumen (m^3)

1.2.4 Viscosidad

Es el movimiento molecular dentro del fluido. La viscosidad es una propiedad que describe la “fluidez” de un fluido.

Las moléculas se desplazan a una velocidad alta y chocan con las moléculas de una velocidad menor y viceversa, este proceso permite trasladar el movimiento de una región del fluido a otra. La temperatura del medio afecta los movimientos moleculares por lo que el valor real de la viscosidad depende del fluido y de la temperatura.

La viscosidad de un gas aumenta con la temperatura; mientras que un líquido disminuye.

La viscosidad cinemática es la propiedad del fluido mediante el cual este ofrece resistencia al esfuerzo cortante. La deformación en los fluidos aumenta bajo la acción de un esfuerzo cortante por pequeño que este sea; y se define como la fuerza para desplazar una capa de una sustancia sobre otra capa de la misma.

1.2.5 Caudal Volumétrico

Es la cantidad de flujo que circula por una sección transversal a una velocidad determinada, se expresa de la siguiente manera:

$$Q = S * v \quad (1-4)$$

Donde:

Q - Caudal Volumétrico (m³/s)

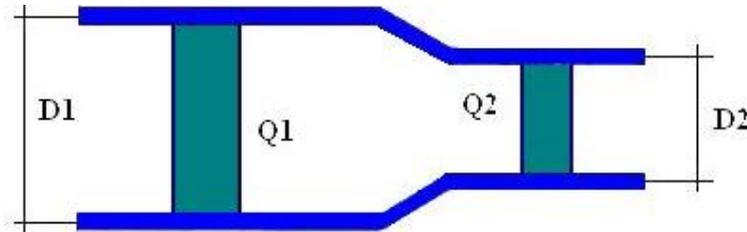
S – Área transversal (m²)

V - velocidad del gas (m/s)

El gas que circula por el interior de un tubo recto, mantiene una trayectoria paralela a las paredes del tubo. La velocidad es mayor cuando las partículas se encuentran más cerca del centro del tubo. Cuando un tubo cambia de diámetro, se vuelve angosto, el gas circula a mayor velocidad y se origina el efecto venturi.

En la figura 1.1 se muestra gráficamente como influye el cambio de diámetro del tubo en la velocidad del gas. El caudal Q_1 es el de un cilindro con el diámetro de la base igual a D_1 y el caudal Q_2 , tiene un diámetro D_2 .

Figura 1.1: Cambio de sección circular.



1.2.6 Ecuación de la continuidad

El caudal volumétrico es igual en las dos secciones, pero al pasar por el diámetro más pequeño se incrementa la velocidad para el mismo volumen.

$$Q_1 = Q_2 \quad (1-5)$$

Al reemplazar la ecuación 1-4 en 1-5 se consigue la ecuación de la continuidad.

$$Q = S_1 * v_1 = S_2 * v_2 \quad (1-6)$$

Para una sección circular se utiliza la siguiente fórmula:

$$S = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (1-7)$$

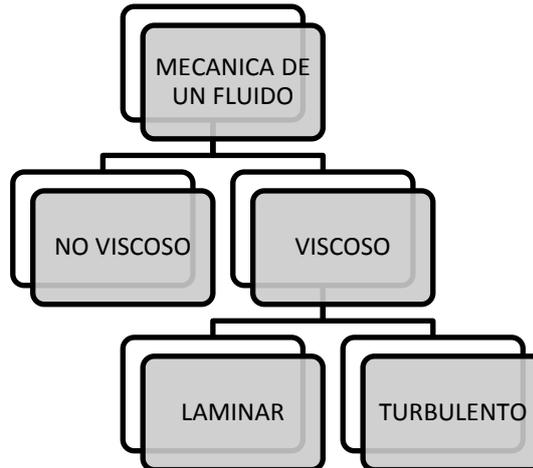
La fórmula para calcular la velocidad se obtiene al reemplazar la ecuación 1-7 en 1-6.

$$D_1^2 * v_1 = D_2^2 * v_2 \quad (1-8)$$

1.3 Tipos de flujo

El movimiento de un fluido se conoce como flujo; depende de la viscosidad del fluido para su clasificación. Se puede observar en la figura 1.2 la clasificación.

Figura 1.2: Clasificación de los tipos de flujo

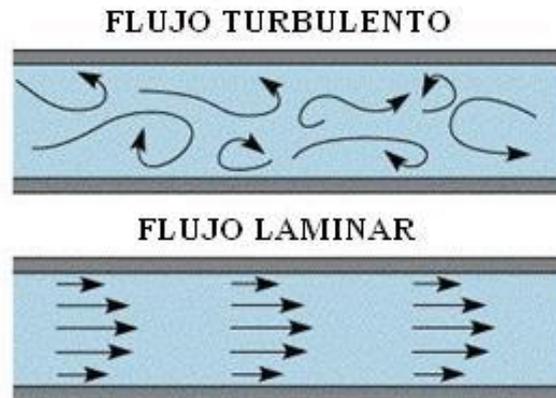


En un fluido no viscoso suponemos que la viscosidad del fluido vale cero, pero en la realidad estos flujos no existen; pero hay varios problemas en los cuales se utiliza esta hipótesis para simplificar y obtener resultados.

En el flujo turbulento, figura 1.3, las partículas del fluido se mueven de una manera desordenada, siguiendo trayectorias muy irregulares, por lo que no existen líneas de corriente, este flujo origina una mayor tensión de cortadura en el fluido y produce pérdidas de energía mecánica.

En el Flujo laminar, figura 1.3, las partículas se mueven a lo largo de capas o laminas y se deslizan una sobre otra, de una manera ordenada; en este caso se cumple la ley de Newton de la viscosidad; se relaciona la tensión de cortadura con la velocidad angular de deformación; la acción de la viscosidad frena la tendencia a crear turbulencia; se puede transformar en flujo turbulento cuando la velocidad es grande, o el caudal o la viscosidad es pequeña.

Figura 1.3 Flujo turbulento y laminar



El fluido ideal es incompresible y no presenta rozamiento, se utiliza cuando intervienen grandes extensiones de un fluido, se supone que tiene viscosidad nula.

La capa límite, es la capa inmediata de un contorno de flujo real, en la cual la velocidad relativa se ve afectada; pueden ser laminares o turbulentas dependiendo de su longitud, la viscosidad, la rugosidad del contorno y la velocidad de flujo también determinan el tipo de capa.

Cuando se presenta sobre superficies lisas la capa límite empieza siendo una capa laminar, la cual consiste en una capa fina donde las partículas se mueven. Al ampliarse el espesor de la capa límite esta se vuelve inestable y se transforma en una capa turbulenta en la cual las partículas se mueven al azar. Siempre se mantiene una capa muy fina llamada sub capa laminar alrededor de la pared.

1.4 Dinámica de los fluidos

La estática de fluidos es casi una ciencia exacta, la densidad es la única variable que se determina de forma experimental. El verdadero movimiento de un fluido es muy complejo; las leyes que determinan el movimiento no han sido desarrolladas por completo, por lo que se necesita recurrir a la experimentación. Se necesita combinar análisis de termodinámica y principios de mecánica para así obtener resultados satisfactorios.

Existen ecuaciones básicas que permiten determinar el comportamiento de un fluido pero no son de una manera exacta, estas ecuaciones son de movimiento, de la continuidad y de la cantidad de movimiento.

La fórmula que se utiliza para el cálculo del número de *Reynolds*, en tuberías es la siguiente:

$$R_E = \frac{V * D}{\nu} \quad (1-9)$$

Donde:

V – Velocidad flujo (m/s)

D – Diámetro (m)

ν – Viscosidad cinemática (m²/s)

El numero de Reynolds demuestra la tendencia del flujo, cuando este es pequeño el flujo es laminar y al ser un numero grande es turbulento, Tabla 1.1

Tabla 1.1: Valores del numero de Reynolds.

Numero Reynolds	Flujo
Menor a 2000	Laminar
2000 a 4000	Indeterminado
Mayor a 4000	Turbulento

Existe una variación cuando se calcula el número de Reynolds en secciones transversales no circulares; se utiliza:

$$R_E = \frac{V * 4R}{\nu} \quad (1-10)$$

$$R = \frac{S}{PM} \quad (1-11)$$

Donde:

V – Velocidad del flujo de aire (m/s)

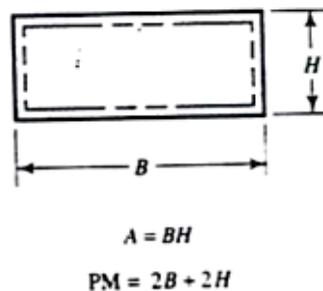
R – Radio Hidráulico

S – Sección Transversal (m²)

PM – Perímetro mojado.

La dimensión R se conoce como radio hidráulico y se define según sea la tubería por la que pasa el fluido; PM es la sumatoria de los lados de la tubería que están en contacto con el fluido, en el caso de ser una tubería rectangular Figura 1.4.

Figura 1.4: Sección transversal no circular



Fuente: Robert L. Mott, “Mecánica de fluidos aplicada”, 1996.

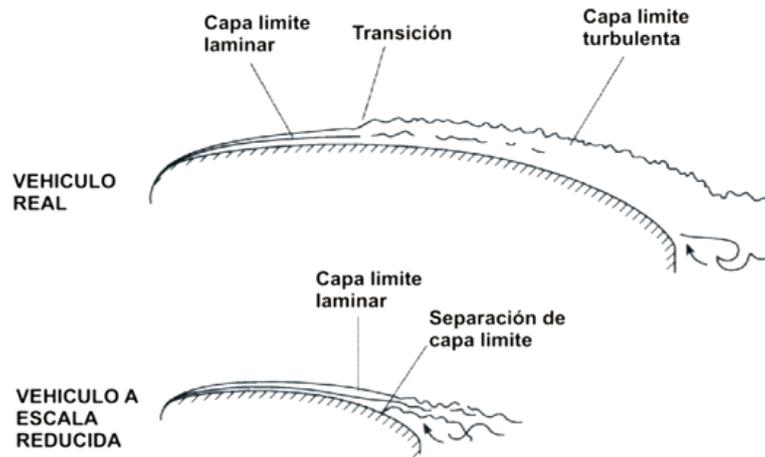
Reemplazando la ecuación 1-6 en 1-5 se obtiene:

$$R_E = \frac{V * 4 \left(\frac{S}{PM} \right)}{v} \quad (1-12)$$

El número de Reynolds, se utiliza para estudiar la similitud dinámica de los flujos sobre un cuerpo y sus modelos a escala. Cuando el número de Reynolds es igual en puntos similares del modelo a escala y el cuerpo real o prototipo; la similitud mecánica es exitosa. Esta relación fue descubierta por Osborne Reynolds (1883), se le denomina el principio de similitud.

El principio de similitud aplicado a los vehículos de carretera, es muy importante debido a que influye determinantemente sobre las características de la capa límite a escalas diferentes. En la Figura 1.5, se observan estas diferencias.

Figura 1.5: El número de Reynolds y su influencia en la capa límite.

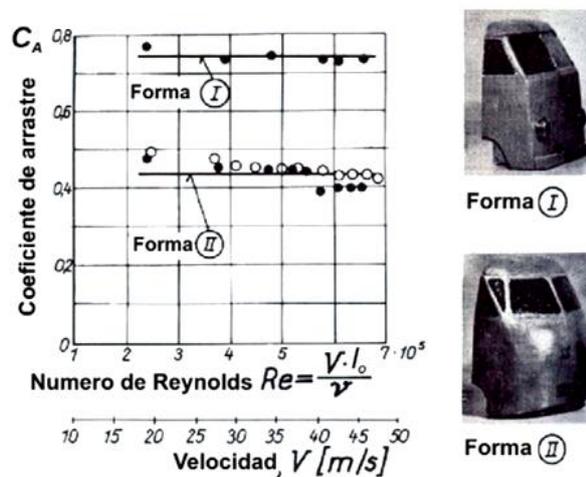


Fuente: R. H. Barnard, "Road Vehicle Aerodynamic Design", 1996.

Se observa en la Figura 1.5 el cambio entre la capa límite laminar y turbulenta, sucede en lugares diferentes entre el vehículo real y el modelo a escala. De este modo el coeficiente de arrastre varía con respecto al número de Reynolds.

H. Schlichting, expone resultados experimentales de pruebas realizadas en dos modelos diferentes a escala para la compañía Volkswagen, Figura 1.6, se observa que los coeficientes de arrastre para ambos casos, mantienen una tendencia constante en el rango de $Re=2 \times 10^5$ a $Re=7 \times 10^5$.

Figura 1.6: Coeficiente de arrastre respecto al número de Reynolds



Fuente: H. Schlichting, "Aerodynamic Problems of Motor Cars", 1960

1.5 Ecuación general de la energía

Se parte de la ecuación de Bernoulli y se aplica la ecuación general de la energía. La ecuación de Bernoulli detalla la forma con la cual se comporta un fluido en diferentes condiciones.

Ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\lambda} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\lambda} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (1-13)$$

P – Presión (Pa)

λ - Peso específico (kg/m³)

v – velocidad del fluido (m/s)

g – gravedad 9.8 m/s²

z – altura (m)

Para la aplicación de esta fórmula se toma en cuenta los siguientes aspectos:

- La velocidad del flujo en un punto determinado no se altera con el tiempo; el movimiento del fluido tiene un régimen estacionario.
- Se desprecia la viscosidad del fluido.
- El líquido se encuentra bajo un campo gravitatorio único.

Ecuación general de la energía:

$$\frac{P_1}{\lambda} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\lambda} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (1-12)$$

Donde:

h_A – Energía entregada (m)

h_R – Energía perdida (m)

h_L – Energía absorbida (m)

1.6 Coeficientes de arrastre y sustentación

El coeficiente de arrastre es una fuerza que se genera y se contrapone al movimiento del cuerpo; y la de sustentación, es una fuerza que se crea en dirección perpendicular al movimiento del cuerpo, son medidas a dimensionales que describen la cantidad de cada fuerza.

Coeficiente de arrastre:

$$C_d = \frac{2F_d}{\delta S V^2} \quad (1-13)$$

Donde:

C_d – Coeficiente de arrastre (adimensional)

F_d – Fuerza de arrastre (N)

δ – Densidad (kg/m^3)

S – Área de la superficie de estudio (m^2)

V – Velocidad del flujo relativo (m/s)

Coeficiente de sustentación:

$$C_l = \frac{2F_l}{\delta S V^2} \quad (1-14)$$

Donde:

C_l – Coeficiente de Sustentación (adimensional)

F_l – Fuerza de sustentación (N)

δ – Densidad (kg/m^3)

S – Área de la superficie de estudio (m^2)

V – Velocidad del flujo relativo (m/s)

CAPITULO II

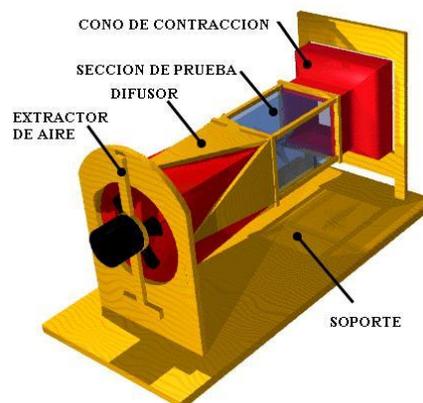
DISEÑO DEL TÚNEL DE VIENTO

2.1 Introducción

La finalidad del túnel de viento que se construye a escala pequeña, es demostrar el comportamiento de las líneas de corriente del flujo de aire al pasar por un objeto, además, permite modificar la velocidad del viento dentro del túnel y la posición del cuerpo. Al hacer estos cambios en los elementos, se crean diferentes situaciones, simulando flujos laminares hasta flujos turbulentos. La interacción del usuario permite comprender de mejor manera los fenómenos que se producen, cuando el aire incide en un cuerpo al encontrar soluciones aerodinámicas mediante un método práctico.

El dispositivo que se observa en la figura 2.1 funciona de la siguiente manera: el aire es aspirado por el extractor a través del cono de contracción, hacia la sección de prueba donde distintos cuerpos son montados para el estudio y luego es expulsado a la atmosfera.

Figura 2.1 Funcionamiento del túnel de viento



El diseño que se presenta es viable, y es una maqueta que permite interactuar con los fenómenos de la mecánica de fluidos.

Se impulsa el paso de aire a través del objeto que permanece fijo y mediante niebla artificial se observa el movimiento de partículas que pasan alrededor de la superficie del objeto. Figura. 2.2; de este modo se explica los fenómenos de la aerodinámica que se producen alrededor de un objeto.

Figura 2.2: Movimiento de partículas.

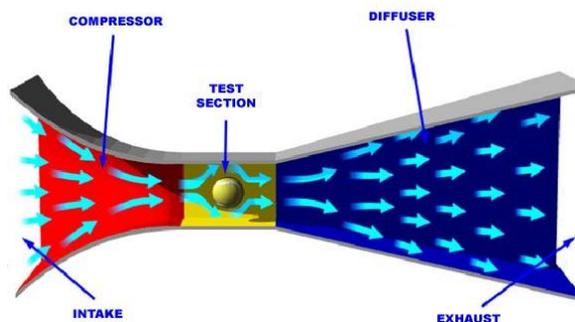


Fuente: <http://www.circulaseguro.com/vehiculos-y-tecnologia/la-aerodinamica-la-visibilidad-y-la-senalizacion-durante-el-transporte-de-bicicletas>

2.2 Dimensionado del túnel de viento

El túnel de viento se construye de tipo abierto o *Eiffel*, se indica en Figura 2.3, se usa este modelo por ser el más utilizado para fines didácticos. Existen varios tipos de túneles como los cerrados o cíclicos, que utilizan el aire; además, hay los que utilizan agua, pero el costo es elevado y la complejidad para su construcción es mayor.

Figura 2.3: Túnel de viento abierto



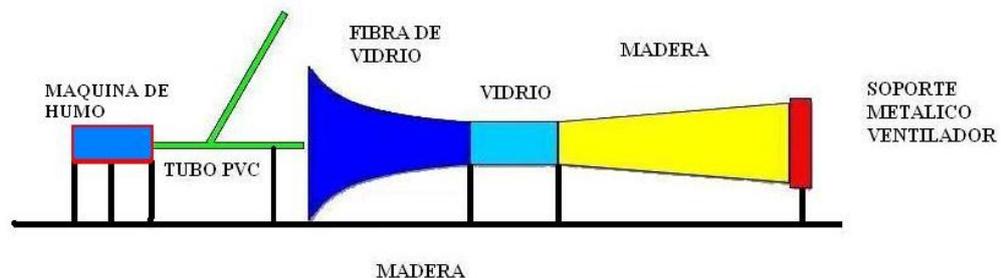
Fuente: <http://www.efectosuelo.com/tunel-de-viento-contra-cfd/>

Las dimensiones para el túnel de viento se basan en un modelo didáctico que es utilizado por la NASA, (Anexo 1). Se hacen modificaciones en función de los elementos que se encuentran en nuestro medio.

Un túnel de viento está diseñado con 5 elementos que permiten simular el comportamiento del aire a gran velocidad, cuando atraviesa un objeto. El diseño genera un flujo de aire de alta velocidad, y una zona de baja turbulencia, donde se estudia el objeto y se obtienen los resultados del experimento.

El túnel de viento se compone de: entrada de humo, cono de contracción, sección de prueba, difusor, extractor de aire; se indica en la figura 2.4.

Figura. 2.4: Esquema del Túnel de viento.



2.3 Diseño del túnel de viento

Uno de los componentes más importantes del túnel de viento es la visualización de flujo. La ventaja que ofrece el túnel de viento es la visualización en una situación real, observando cómo reacciona el flujo de aire al atravesar el cuerpo o elemento que se estudia. Permite diseñar, construir e investigar los objetos para luego ser probados en el túnel de viento, siendo una manera muy eficaz de aprender los conceptos de aerodinámica.

2.3.1 Entrada de humo

El movimiento de las aspas del extractor crea un efecto de remolino en el aire y produce turbulencia en el túnel de viento. Por esta razón se diseña la entrada que evita la turbulencia; es un tubo que inyecta el humo en la entrada de la cámara de estudio y es conducido por el aire que ingresa a gran velocidad.

Se utiliza una máquina figura 2.5 para crear el efecto de humo, se forma al vaporizar agua mezclada con glicol o glicerol, el más utilizado es glicerina, este líquido es inyectado sobre un metal caliente y se evapora rápidamente creando la niebla.

Figura 2.5: Máquina de niebla



Fuente: <http://www.italyaudio.com/efecto-ITL0010.html>

2.3.2 Cono de contracción

El aire que ingresa tiene una velocidad muy baja y un volumen grande; durante el paso por el cono de contracción, se incrementa la velocidad de flujo de aire y se reduce el volumen, generando el efecto venturi, incrementando la velocidad del aire que ingresa a la cámara de estudio.

Para calcular la velocidad que tiene el ventilador se utiliza una tabla que indica la velocidad en función del tamaño del conducto por el cual se extrae el aire y el caudal; anexo 2, pérdidas de carga en conductos circulares.

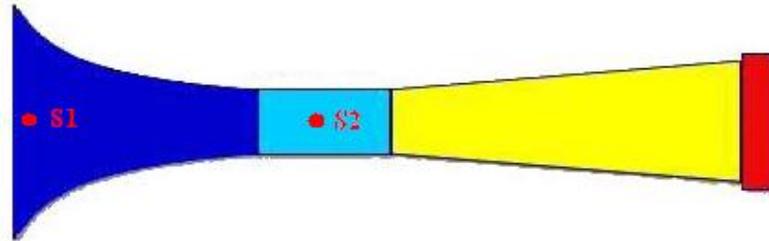
Tabla 2.1: Datos de funcionamiento del extractor de aire.

Tamaño Diámetro	Potencia Watts	Capacidad Absorción (m³/min)	Área de Aplicación m²
10"-254mm	38W	486	30-25

Se obtiene una velocidad de aproximadamente 3 m/s, este dato se asume como la velocidad de ingreso del aire al cono de contracción.

Para comprobar si el ventilador tiene la suficiente potencia se realiza el siguiente cálculo, en la figura 2.6 se indica los puntos en los cuales se analiza.

Figura 2.6: Puntos de análisis.



Se utiliza la ecuación de continuidad, 1 – 6, para calcular la velocidad.

$$V_1 * S_1 = V_2 * S_2$$

$$V_2 = \frac{V_1 * S_1}{S_2}$$

Donde:

$$S_1 = 0.46 * 0.32 = 0.15 \text{ m} \text{ (Plano \#3)}$$

$$S_2 = 0.18 * 0.27 = 0.04 \text{ m} \text{ (Plano \#2)}$$

$$V_1 = 3 \text{ m/s} \text{ (Tabla 2-1)}$$

$$V_2 = \frac{3 * 0.15}{0.04}$$

$$V_2 = 11.25 \text{ m/s}$$

Calculo del Caudal volumétrico, se aplica la ecuación 1-5.

$$Q = V * A$$

$$Q = 11.25 * (0.18 * 0.27)$$

$$Q = 0.54 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.3.3 Sección de prueba

La sección de prueba se utiliza para realizar los experimentos del objeto que se analiza. Aquí se observa el comportamiento del flujo de aire que atraviesa el objeto.

Numero de Reynolds para diseño del túnel de viento, Ecuación 1 – 8.

$$R_E = \frac{V * 4R}{\nu}$$

$$R = \frac{A}{PM}$$

$$R = \frac{0.18 * 0.27}{2(0.18) + 2(0.27)}$$

$$R = 0.054 \text{ m}$$

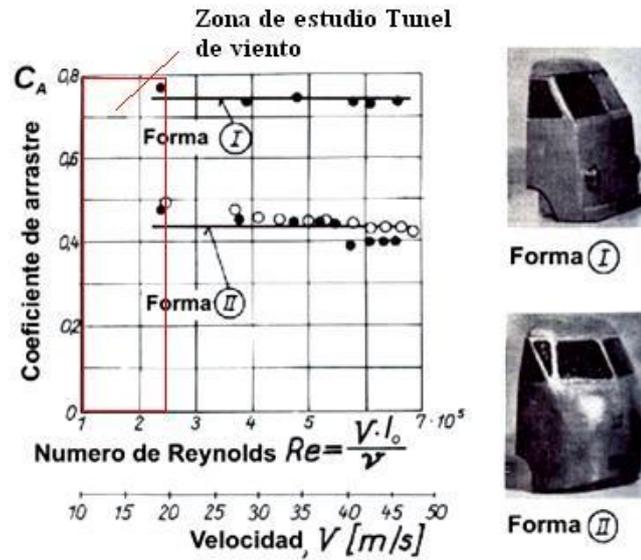
$$R_E = \frac{V * 4R}{\nu}$$

$$R_E = \frac{11.25 * 4 * 0.054}{1.51 \times 10^{-5}}$$

$$R_E = 1.6 \times 10^5$$

Comparando el resultado obtenido con los estudios realizados por H. Schlichting, Figura 2.7, indican un resultado satisfactorio para el túnel de viento que se construye. El coeficiente de arrastre varía de 0.2 a 0.8, dependiendo de la forma aerodinámica que tenga el objeto de estudio.

Figura 2.7: Coeficiente de arrastre respecto al número de Reynolds



Fuente: H. Schlichting, "Aerodynamic Problems of Motor Cars", 1960

2.3.4 Difusor

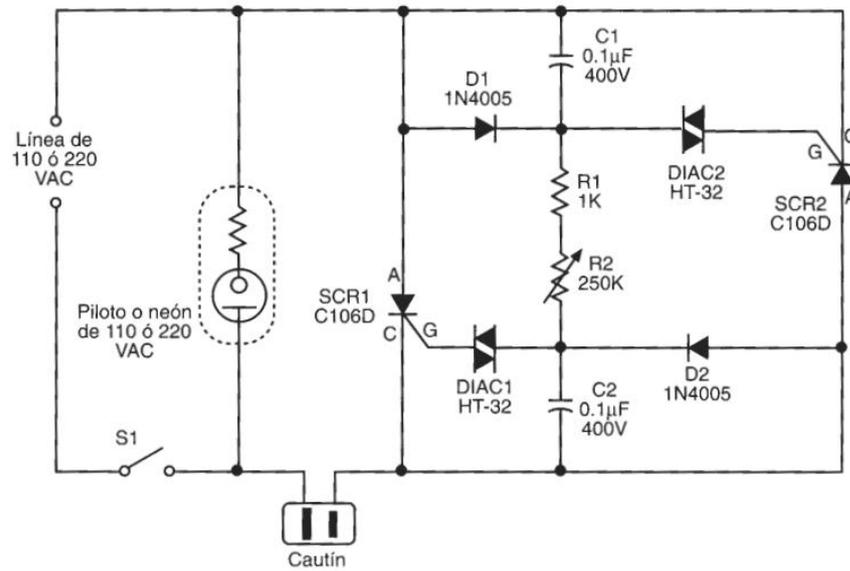
Es un canal en el que la velocidad de la corriente de aire a la salida del túnel, disminuye para luego ser descargado a la atmósfera.

2.3.5 Fuente de aire

Se encarga de aspirar el aire de la atmósfera, e ingresarlo al túnel de viento; se utiliza un extractor ya que éste genera menor turbulencia que un ventilador y las líneas de humo se aprecian mejor. Además, las aspas del extractor están invertidas para aspirar el aire de una mejor manera.

Se utiliza un controlador de potencia, el cual permite regular la corriente alterna que recibe el motor eléctrico del extractor y variar las revoluciones del motor. El circuito posee un interruptor y luz piloto para indicar que está encendido. En el gráfico 2.8, se observa el esquema de construcción. El controlador está instalado en una caja de madera para su protección y facilidad de manejo.

Figura 2.8: Diagrama esquemático del control de velocidad.



Fuente: Manuales Cekit, Proyecto N°26.

Factor de Fricción:

$$h = \lambda \frac{L * V^2}{PM * 2g}$$

Donde:

h – Perdidas (m)

L – Longitud (m)

V – Velocidad Máxima (m/s)

PM – Perímetro mojado (m²)

h – Vidrio:

$$h = 0.027 \frac{0.3 * 12^2}{0.9 * 2(9.81)} = 0.07m$$

h – Madera:

$$h = 0.028 \frac{0.46 * 12^2}{0.9 * 2(9.81)} = 0.1m$$

h – Poliéster:

$$h = 0.027 \frac{0.35 * 12^2}{0.9 * 2(9.81)} = 0.08m$$

Para calcular los factores de fricción nos referimos al anexo 2.

Tabla 2.2: Factor de fricción y perdidas por rozamiento

Material	Rugosidad - ϵ (m)	Factor de fricción (λ)	Longitud (m)	Pérdidas (m)
VIDRIO	3,0E-07	0,027	0.3	0.07
MADERA	2.5E-4	0.028	0.46	0.1
POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO	1E-5	0.027	0.35	0.08

PERDIDAS DE PRESION EN EL TUNEL DE VIENTO h_L

Tabla 2.3: Perdidas de presión en el Túnel de viento.

PARTE	LONGITUD (m)	PERDIDAS (m)
Sección de Prueba	0.3	0.07
Difusor	0.46	0.1
Cono de Contracción	0.35	0.08
	1.11	0.25
Perdidas Secundarias	10%	0.11
Total		0.36

Ecuación General de la Energía:

$$\frac{P_1}{\lambda} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\lambda} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$0 + 0 + \frac{3^2}{2(9.81)} + h_A - 0 - 0.36 = 0 + 0 + \frac{12^2}{2(9.81)}$$

$$h_A = 7.24m$$

Potencia requerida por el ventilador

$$Potencia = \frac{Q * \rho * h_A}{\eta}$$

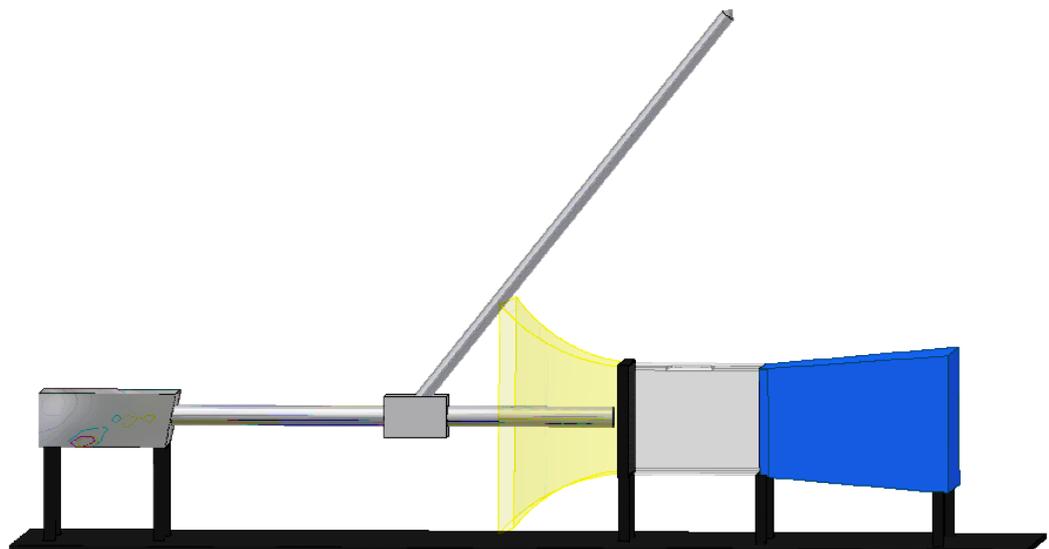
$$Potencia = \frac{0.14 * 11.81 * 7.12}{0.9}$$

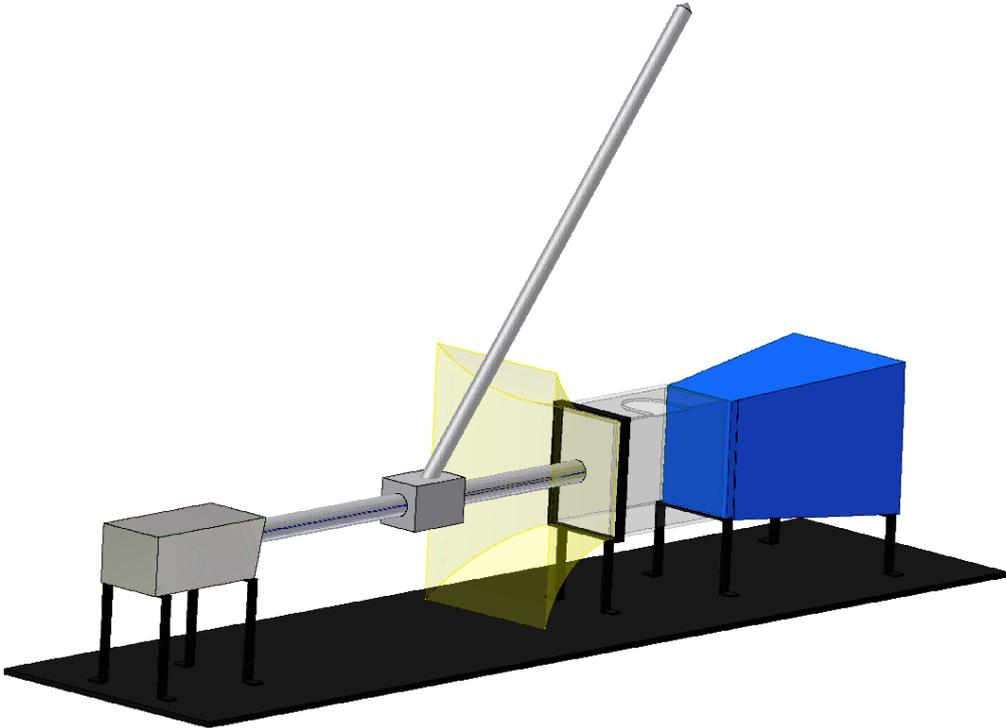
$$Potencia = 13.3 \text{ Watts}$$

Se utiliza este extractor de aire que tiene más potencia que lo necesitado por que en el mercado no hay uno de una potencia similar, para la construcción del túnel de viento este ventilador mejora el soporte del difusor.

En el anexo numero 3, se observa las laminas de cada uno de los elementos de la construcción del túnel de viento; en la figura 2.9 se muestra un esquema en tres dimensiones del túnel de viento.

Figura 2.9: Esquema 3d del Túnel de viento.





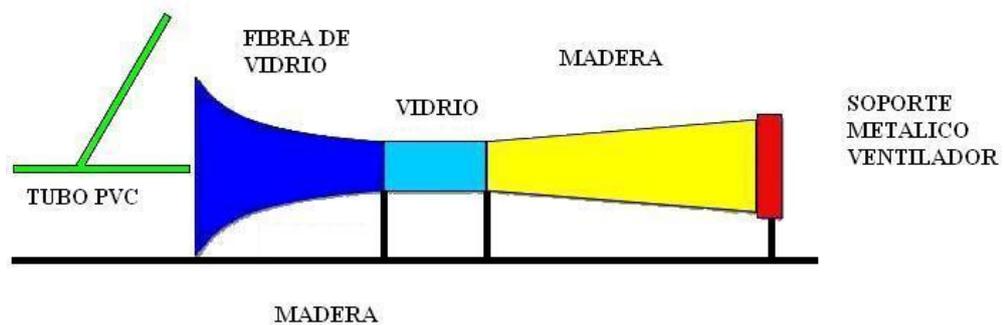
CAPITULO III

CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

3.1 Materiales y elementos para la construcción

Los materiales para la construcción del túnel de viento, se indica en la figura 3.1; entre los principales: madera, fibra de vidrio, vidrio, tubo PVC, platina de metal.

Figura 3.1: Materiales para la construcción



3.2 Construcción

La construcción inicia por el cono de contracción, se elaboran 2 moldes de madera rectangulares; que forman un marco para sujetar la tela con grapas y cola blanca.

Se da la forma de cono, estirando la tela hasta llegar al otro marco de madera, debe quedar lo más firme posible, Figura 3.2.

Figura 3.2: Poliéster



Se aplica la primera capa de resina sin fibra de vidrio, para que la tela se vuelva rígida y poder colocar posteriormente la fibra de vidrio.

Luego se prepara la fibra de vidrio se corta en pequeños cuadros como se observa en la figura 3.3, y se aplica la resina con el catalizador, con una pequeña brocha, alrededor de toda la tela; repetimos este procedimiento hasta lograr el espesor de 2mm.

Figura 3.3: Cortes de fibra de vidrio



Se deja secar el cono durante 5 horas, para que la tela y la fibra de vidrio se vuelvan rígidos y formen un solo cuerpo. Se limpia el cono con disolvente y se aplica pintura color plomo que funciona de color base; se indica en la figura 3.4, se deja secar la pintura durante una hora.

Figura 3.4: Cono de contracción.



Se prepara pintura color azul y se aplica a todo el cono de contracción, se indica en la figura 3.5.

Figura 3.5: Cono de contracción



Para sujetar el cono de contracción se hace 2 soportes metálicos con platina de 1pulg. Estos soportes permiten sujetar el cono de contracción a la madera, además de apoyos para toda la estructura de la maqueta.

La platina es doblada en una entenalla a escuadra, hasta formar un cuadrado que después es soldado, se corta dos pedazos de platina y se suelda al marco, se observa en la figura 3.6, de este modo, la estructura queda sujeto a la madera y al cono de contracción.

Figura 3.6: Estructura de apoyo



La sección de prueba está formada por vidrio, se utilizan 4 vidrios unidos por silicón; el vidrio superior tiene un corte para ingresar los objetos a la cámara de estudio. Se construyen 2 soportes rectangulares con perfiles de aluminio, figura 3.7, en forma de T, para sujetar el vidrio al cono de contracción y al difusor.

Figura 3.7: Soportes de aluminio



La sección del difusor se construye con madera plywood, se cortan 4 pedazos en forma de trapecio, se pegan entre ellos para formar el difusor, figura 3.8.

Figura 3.8: Difusor



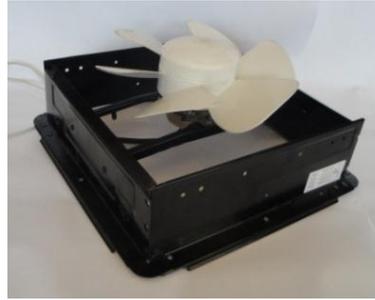
El difusor es pintado con pintura ploma color base y luego con pintura azul para dar el acabado, figura 3.9.

Figura 3.9: Vista final del difusor



Se utiliza el soporte del ventilador para dar rigidez a la estructura y sujetar en el interior del difusor, figura 3.10.

Figura 3.10: Soporte del ventilador



Se construye dos apoyos de platina de acero, se sujetan en los extremos y luego a la madera mediante pernos, figura 3.11.

Figura 3.11: Apoyos



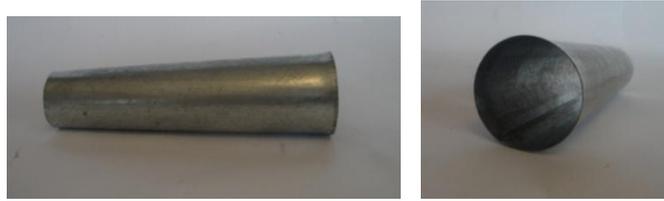
Toda la estructura se sujeta a una madera de plywood de 12mm de espesor, mediante los soportes de platina y pernos, figura 3.12.

Figura 3.12: Soporte de madera



La entrada de humo se une a la maquina mediante un tubo en forma de cono hacia un tubo PVC de 2plg, figura 3.13.

Figura 3.13: Cono de unión



El tubo se une a una división, la parte superior envía el humo que no se necesita a la atmosfera, y la parte inferior es enviada a la cámara de estudio; se construye una salida en forma de rectángulo para direccionar el humo, se observa en la figura 3.13.

Figura 3.14: División y salida de humo



El resultado final de la maqueta se puede observar en la figura 3.15.

Figura 3.15 Maqueta



3.3 Observaciones de funcionamiento

- Se necesita esperar unos minutos hasta que la máquina de humo llegue a la temperatura de funcionamiento, verificar si la máquina tiene el líquido para crear humo.

- Al momento de prender el ventilador utilizamos el potenciómetro para disminuir la velocidad del extractor de aire, hasta llegar a la velocidad más baja para luego incrementar hasta la velocidad que se desee.
- Se recomienda construir los perfiles que se estudian en el túnel de viento de espuma flex, con un ancho mínimo de 8cm; además de pintarlos de un color llamativo para mejorar la visualización de flujo.
- Al colocar el perfil en la base se verifica la altura, para que el humo pase alrededor del perfil y se observen las líneas de flujo.

CAPITULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS DEL TÚNEL DE VIENTO

4.1 Pruebas de funcionamiento experimentales

Se realiza pruebas experimentales para verificar el funcionamiento correcto del túnel; se hace uso de un vehículo a escala para comprobar el flujo de aire, se muestra en la figura 4.1, además de perfiles con formas variadas: esfera en la figura 4.2 y un perfil aerodinámico en la figura 4.3.

Figura 4.1: Vehículos a escala



Figura 4.2: Esfera

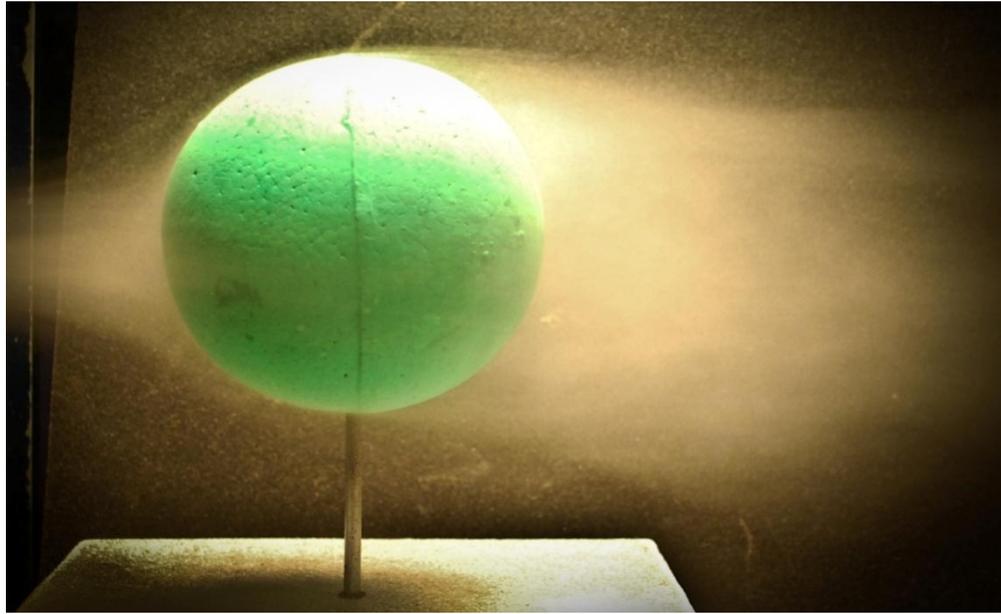


Figura 4.3: Perfil Aerodinámico



Se examina la hermeticidad de la cámara de estudio con humo de tabaco, se acerca a las uniones con el cono de contracción y el difusor, para identificar posibles filtraciones.

4.2 Análisis del perfil aerodinámico en el túnel de viento

El estudio del perfil aerodinámico inicia con la construcción del perfil en Autocad 2008, se utiliza como base la foto de un vehículo, figura 4.4, se hacen correcciones para facilitar la construcción y el estudio; obteniendo el siguiente perfil aerodinámico, figura 4.5.

Figura 4.4: Foto vehículo.



Fuente: <http://foros.hondaclub.com.ar/showthread.php?t=65737>

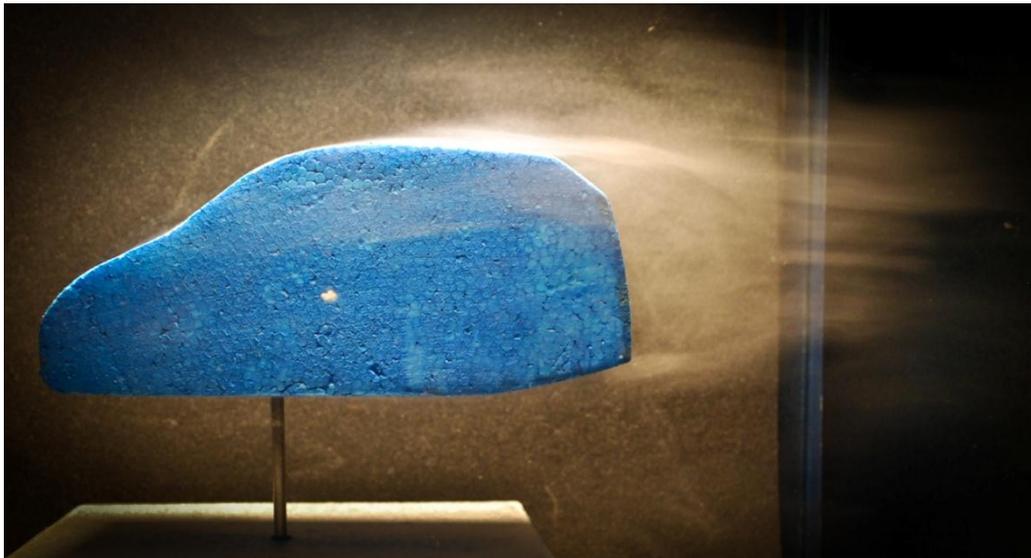
Figura 4.5: Foto perfil



Se utiliza poliestireno, conocido como espuma flex, para construir el perfil; se corta un pedazo, luego con una cuchilla se va dando forma hasta que se asemeje al perfil construido en Autocad, se pasa con lija para pulir la superficie. Se pinta de color azul para facilitar la visualización del humo.

A continuación en la figura 4.6 se observa las líneas de flujo que atraviesan el perfil; durante la simulación. En la parte posterior del perfil se crea turbulencia, en la cual se representa la fuerza de arrastre, además se observa el flujo laminar que se genera en la parte superior e inferior del perfil aerodinámico.

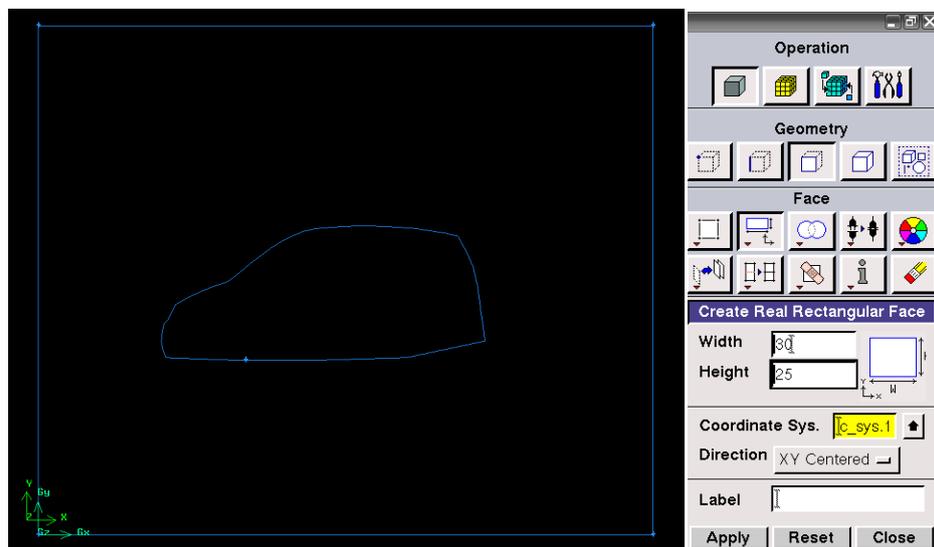
Figura 4.6: Estudio del perfil aerodinámico



4.3 Análisis en el programa CFD

Se importa el perfil dibujado en Autocad al programa Gambit, luego se dibuja la cámara de estudio y se coloca el perfil dentro de los límites en la figura 4.7, se representa con líneas azules el perfil y la cámara de estudio.

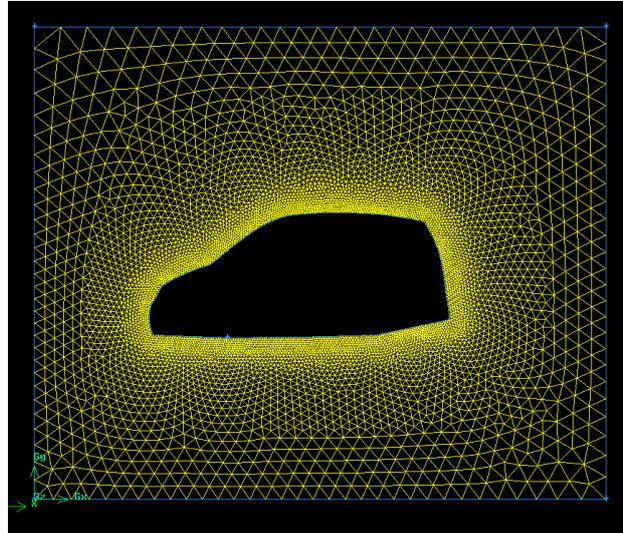
Figura 4.7: Cámara de estudio y perfil aerodinámico



El siguiente paso es crear la malla, esta define la sección que se estudia, debe tener elementos muy finos a los lados del perfil de estudio ya que es la zona más

importante y en la cual se necesita tener los mejores resultados, se observa en la figura 4.8.

Figura 4.8: Mallado del Perfil aerodinámico



Se debe comprobar la calidad de la malla antes de iniciar el proceso de estudio, en el programa se realiza esta comprobación, verifica la distorsión de la celdas para obtener un resultado satisfactorio; en la figura 4.8 se observa los datos, se logra un 96.83% de distorsión mínima, el dato más distorsionado en este caso es 0.467; los datos obtenidos reflejan la calidad del mallado.

Figura 4.9 Calidad de mallado

```

Command> grid quality
Command> face check "v_face.4" quality

Summarizing EQUISIZE SKEW of 2D elements measured for 1 meshed face:
Face v_face.4 meshed using Triangle scheme and size of 1.000000.

```

From value	To value	Count in range	% of total count (11342)
0	0.1	10982	96.83
0.1	0.2	300	2.65
0.2	0.3	36	0.32
0.3	0.4	23	0.20
0.4	0.5	1	0.01
0.5	0.6	0	0.00
0.6	0.7	0	0.00
0.7	0.8	0	0.00
0.8	0.9	0	0.00
0.9	1	0	0.00
0	1	11342	100.00

```

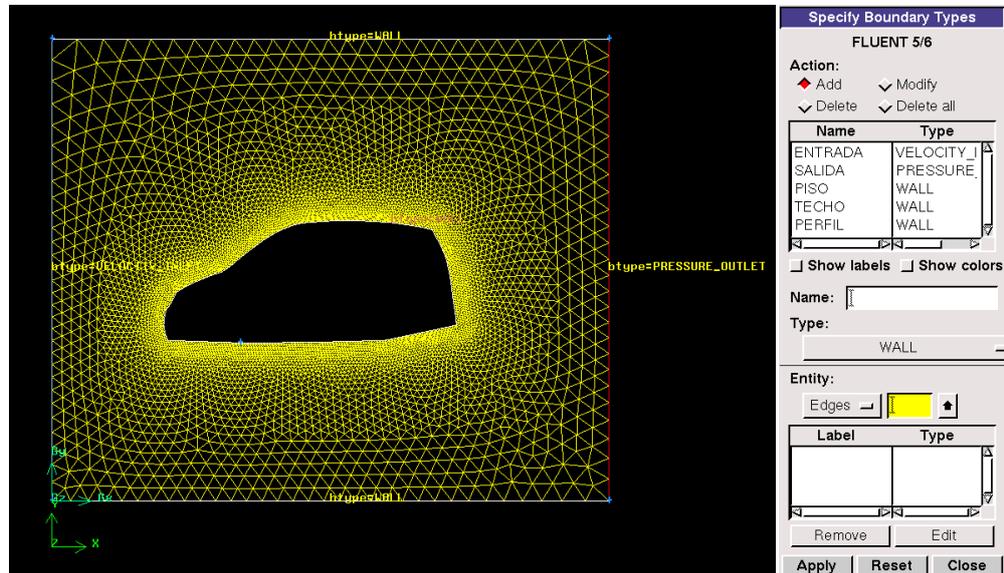
Measured minimum value: 2.36985e-006
Measured maximum value: 0.467437

0 out of 1 meshed face failed mesh check for skewed elements (EQUISIZE SKEW >
0 out of 1 meshed face failed mesh check for inverted elements.

```

Las variables que intervienen en el estudio, tales como: la entrada de aire, las paredes que definen al perfil, la salida de presión de aire; deben ser definidas para el estudio, se indica en la Figura 4.10.

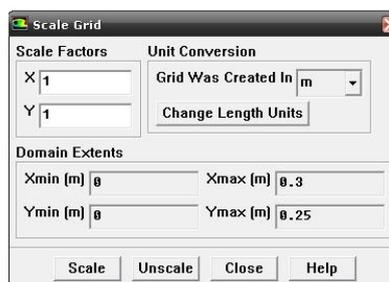
Figura 4.10: Variables de estudio



Luego de realizar este proceso se carga el perfil en el programa Fluent, las variables que se definen son las siguientes:

Dimensiones del objeto de estudio, seleccionamos las unidades, en este caso m (metros). Figura 4.11.

Figura 4.11 Unidades

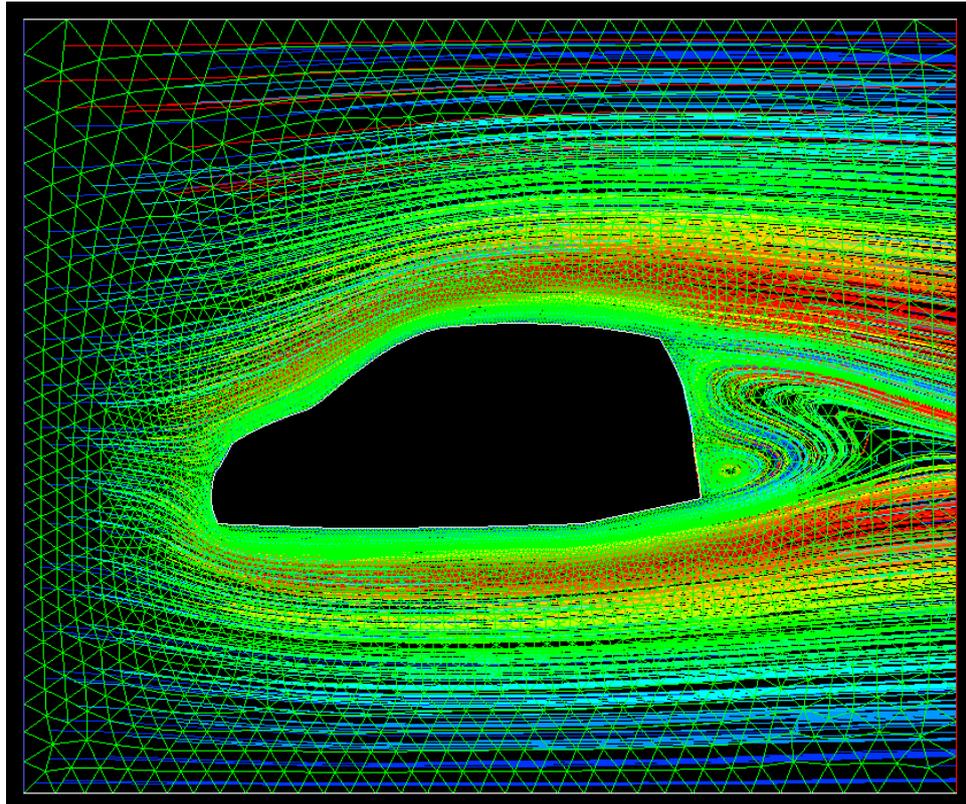


Ya que el régimen del fluido es turbulento, esto se calculo en el capítulo 2, sección 2.3.3. Se utiliza el método *k-epsilon*, los elementos de estudio que intervienen son: la energía cinética, *k* la turbulencia del aire y *e* la disipación de la turbulencia.

Se ejecuta el programa hasta llegar a una convergencia y se obtiene el resultado del estudio.

El resultado es la Figura 4.12, donde se observa las líneas de flujo y la turbulencia alrededor del perfil aerodinámico.

Figura 4.12: Resultado del estudio en el programa Fluent



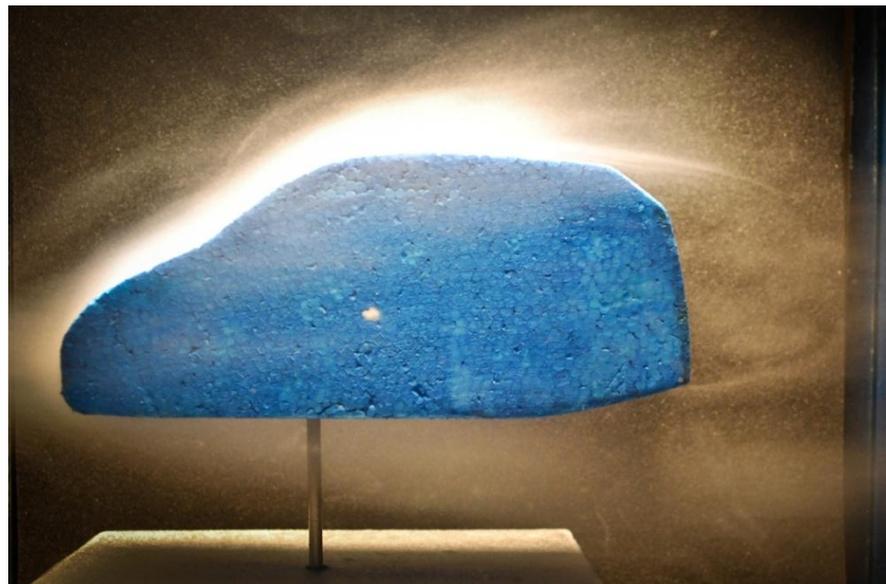
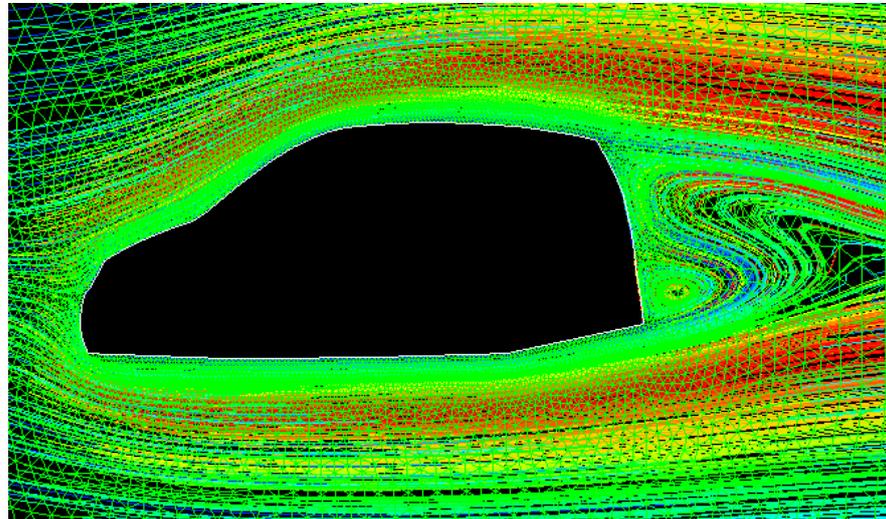
4.4 Validación de resultados

Los resultados que se obtuvieron en el método experimental y la simulación CFD son muy satisfactorios, ya que, los dos se asemejan, como se observa en la figura 4.13.

Durante la simulación y el estudio, se distingue el comportamiento de las líneas de flujo al atravesar el perfil aerodinámico. La simulación en Fluent se distingue claramente el comportamiento de las líneas de flujo en la parte posterior. En la fase de estudio también se nota como las líneas de flujo atraviesan el perfil

aerodinámico y se asemejan a los obtenidos en la simulación. De este modo se comprueba el correcto funcionamiento del túnel de viento didáctico.

Figura 4.13 Comparación de resultados



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El túnel de viento cumple con los objetivos propuestos, ya que simula las líneas de flujo que se consiguen alrededor de los perfiles aerodinámicos que se estudian.

Los resultados obtenidos en el túnel de viento, se validan en un programa de elementos finitos, donde se puede simular el túnel de viento y el perfil que se estudio; además, se obtienen datos muy valiosos como las líneas de flujo, coeficiente de arrastre, sustentación, contornos de presión.

La maqueta que se construyó queda disponible para el uso en el taller de mecánica automotriz, la misma que ayudará a los estudiantes a comprender de mejor manera, el comportamiento del flujo de aire.

Se recomienda que para la construcción de perfiles se utilice, el material “espuma flex”, porque facilita el modelado, además los perfiles deben ser pintados para mejorar la visualización de flujo de humo alrededor de los mismos. La altura del perfil en la cámara de estudio debe ser regulada para visualizar el flujo de aire y utilizar una cámara de fotos o video para obtener una imagen que indique las líneas flujo.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias Bibliográficas:

- KATZ, Joseph/ Plotkin Allen, *Low speed aerodynamics*, McGraw-Hill Book Co., 1991.
- MCBEATH, Simon, *Aerodinámica del vehículo de competición*, 2003.
- MOTT, Robert L., *Mecánica de Fluidos aplicada*, cuarta edición, Pearson, s/f.
- SHAMES, Irving H. , *Mecánica de fluidos*, tercera edición, McGraw-Hill Book Co., 1995.
- STREETER, Victor L., *Mecánica de los fluidos*, octava edición, s/ed., 2000.

Referencias Electrónicas:

<http://www.fi.edu/flights/first/makebigger/index.html#top> (consulta 1 de Agosto 2010), Funcionamiento y construcción de un túnel de viento.

<http://windtunnel.mogap.net/index.htm> (consulta 3 de Agosto de 2010), Tipos de visualización de flujo.

<http://www.tecnoedu.com/Armfield/C15.php> (consulta 5 de Agosto de 2010), Túnel de viento, material educativo y audiovisual.

<http://www.tecnoedu.com/Pasco/Fluidos.php> (consulta 25 de Agosto 2010), Soplador de aire laminar.

http://goliath.ecnext.com/coms2/gi_0199-7362395/Dimensionado-y-construccion-de-un.html (consulta 10 de Septiembre de 2010), Construcción de un túnel de viento de baja velocidad.

<http://www.es.northsails.com/Tecnolog%C3%ADa/EIT%C3%BAneldeViento/tabid/5679/language/en-US/Default.aspx> (consulta 20 de Septiembre de 2010), Ensayos en túnel de viento.

Tesis:

Rojas Zevallos Gerardo Javier. “ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE VEHÍCULO TERRESTRE DE 5,5 TONELADAS MEDIANTE EL USO DE COBERTORES AERODINÁMICOS”, Tesis de Grado, Universidad Nacional de Lima, Facultad de Ingeniería Mecánica, Promoción 2009.

ANEXOS

Anexo 1: Wind Tunnel Assembly.

DIFFUSER SECTION

- Wood Frames

To build the diffuser section, construct a wood frame for the upstream end according to the Diffuser Frame plan and cut a 3/4 inch plywood sheet for the Diffuser Exit according to the Diffuser Exit plan.

- The Triangles

Cut the four triangular top, bottom, and side pieces from flat 1/4 inch plywood according to the Diffuser top and bottom Dimensions template. Using the small ends of these triangular pieces as a guide, cut out the four notches in the 3/4 inch Diffuser Exit piece. Now fit the 4 triangular piece into the wood frame, holding them temporarily in place with masking tape. Make sure the inside of the plywood pieces fit flush with the inside of the frame. Lay the 3/4 inch Diffuser Exit on a flat surface, notch side up. Making sure the top of the wood frame is lined up with the top of the Diffuser exit and with the triangular pieces hanging from the frame, fit these triangular sides, top, and bottom into the notches in the Diffuser Exit. When everything looks okay, add epoxy to all joints and reassemble, holding everything together with small brads until the epoxy sets.

- The Curved Surfaces

The curved surfaces between the top and side triangular pieces are formed with tag board available from art supply stores. Cut this tag board about 1/8 inch larger than the opening. Cut three more pieces of tag board this same size since all openings are the same. Temporarily tape the tag board on the inside of the diffuser using 1/2 inch masking tape. From the outside, run a fillet of epoxy or polyester resin around the perimeter of the tag opening. Cut four pieces of 7 oz. fiberglass cloth the same size as the exposed tag board. Brush a coat of polyester resin through the fiberglass cloth to saturate both the glass and tag board. If more stiffness is desired, a second layer of fiberglass can be added.

THE ENTRANCE CONE

- Assembling Frames

Construct a simple wood frame for the front of the Entrance Cone according to the specifications for the Entrance Cone frame. The back of the Entrance Cone (where it joins the test section) is a wooden frame constructed just like the Diffuser Frame.

- Assembling Boards

Cut the Entrance Cone top, bottom, and sides using the coordinates from the "Entrance Cone Template" drawings. Cut the curved surfaces from thin poster board available at art supply stores. Pre-bend the curvature of the poster board top, bottom, and sides to their approximate finished shape, then glue each piece to its corresponding notch cut in the large entrance cone's frame. Temporarily tape together the edges of the entrance cone's curved sides. Slip the entrance cone exit frame over the exit end of the poster board curved surfaces. Permanently glue the edges of the board together with a fillet of waterproof adhesive such as epoxy. After the glue has set, remove the tape and set the entrance cone face down on a flat surface. Measure from the exit of the entrance cone to the flat surface to make sure that the exit is parallel to the entrance. Trim the exit if necessary. Now glue the exit frame to the poster board exit using masking tape to temporarily hold the poster board to the exit.

- Hardening the Poster board carefully lay a layer of 7 oz. fiberglass cloth on one side of the entrance cone. Cut the cloth such that each end just touches the wood frames. Let the sides extend past the edges 1/2 to 1 inch. Brush a coat of polyester resin through the fiberglass to saturate both the glass and poster board. Let the resin partially harden, then use a razor blade to trim the edges flush with the sides. If more stiffness is desired, a second layer of fiberglass cloth can be added.

- The Flow Straightener

The ideal flow straightener for the 7 X 10 inch wind tunnel is a 1/4 inch cell by 1 inch thick phenolic or aluminum honeycomb. If this cannot be found, two layers

of "egg crate" florescent light diffuser that have been glued back to back give adequate results. Use model airplane glue or

Super glue to bond both halves together, being careful to align the halves as best you can. Saw the "egg crate" to a size slightly larger than 14 X 20 inches, then carefully trim the edges such that it fits snugly into the front part of the entrance cone. When fitted properly, it will secure itself in place by friction only.

TEST SECTION

- The Plexiglas Pieces

To construct the test section, cut all test section pieces from a 12 x 36 inch piece of 1/4 inch Plexiglas according to the Test Section plan. Cut the top, bottom and sides to exactly fit into the wooden frame at each end of the test section. With the Entrance Cone facing down (large end down) place the Plexiglas top, bottom, and sides in the Entrance Cone frame, temporarily holding the pieces together with tape. Mark each piece of Plexiglas, identifying each piece and its orientation so that there will be no confusion as to what piece goes where during assembly. Drill through the existing holes in the wood frame with a #32 drill bit and into the Plexiglas only about 1/32 of an inch. After each of the four pieces of Plexiglas have been "spotted" in this manner, remove the Plexiglas from the frame and drill each "spot" with a #43 drill and then tap each hole with a 4-40 tap. Lay out and drill the 4-40 clearance holes (#32 Drill) along the bottom edges of the side pieces and also at each end of the top piece. Countersink the outside of these drilled holes (not the tapped holes) with a 1/4 inch 82° countersink. Reassemble the Plexiglas pieces into the Entrance Cone frame using 4-40 x 3/4 flat head machine screws. "Spot" the six (6) holes in the bottom Plexiglas piece using a #32 drill through the holes that were just countersunk. Also "spot" the two holes in the top edge of the sidepieces. Disassemble once again and then drill the "spotted" holes 1/2 inch deep using a #43 drill. (Wrap a small piece of masking tape 1/2 inch from the tip of the drill to act as a drill depth gauge.) Tap there drilled holes for a 4-40 machine screw. Lay out a precise longitudinal centerline on both the Plexiglas bottom and top door pieces. Carefully scribe both centerlines. These lines are used as a reference for setting tunnel models at zero degrees angle of attack prior to testing. Assemble the four pieces of Plexiglas test section using 4-

40 x 1/2 flat head machine screws where appropriate. Set the Plexiglas test section on the diffuser frame and "spot" the eight (8) screw holes as before then drill (#43) and tap the holes. Screw the test section to the Diffuser and Entrance Cone using 4-40 x 3/4 flat head screws. Now carefully trim the Door on the top of the test section such that its sides are flush with the test section sides and there is no gap between the top and the door. Attach the door to the top using two 3/4 inch brass hinges, and 4-40 machine screws.

MOTOR/FAN MOUNTING

The Fan Screen with the motor mounting slots must be cut down in diameter to a dimension somewhere between 16 and 17 inches. The Motor should be 1/4 HP, 1625 RPM, 2.7A, 110V, 60 Hz, AC 3-speed and should mount directly to the outside of this screen with four 10-32 nuts and washers.

- The Fan

The fan should be mounted close to the screen, maintaining about 1/4 inch clearance from the screen. The Fan Blade is mounted such that the blade hub flange is facing upstream. When mounting the Fan Blade, make sure that the set screw is tight. Add a drop of Lucite on the set screw threads for added insurance against vibration loosening the Fan Blade. Further security can be attained by drilling a slight dimple on the motor shaft where the set screw contacts the shaft. Set the finished diffuser section with the exit facing up. The Fan/Motor/Screen assembly is then placed on top of the exit. Carefully position the Fan assembly so that the blade is centered in the opening and you have at least 1/16 inch blade tip clearance. Fasten the screen to the 3/4 inch plywood with four metal screen clips screwed to the wood with #8x1 sheet metal screws. Place a 3/4 inch by 1/8 thick foam pad under each Screen Clip. As for the motor hookup, the motor starting capacitor is attached to the motor with a strap. The motor controls are housed in a 4 inch duplex box mounted on the outside of the 3/4 inch plywood Diffuser exit. This box houses the three speed fan switch as well as variable speed motor control that is connected in series with the high speed motor winding wire. Verify that the motor rotation is counterclockwise when facing upstream. Protect all wires and connections between the motor and the control box with a flexible conduit.

CENTERBODY AND SCREEN

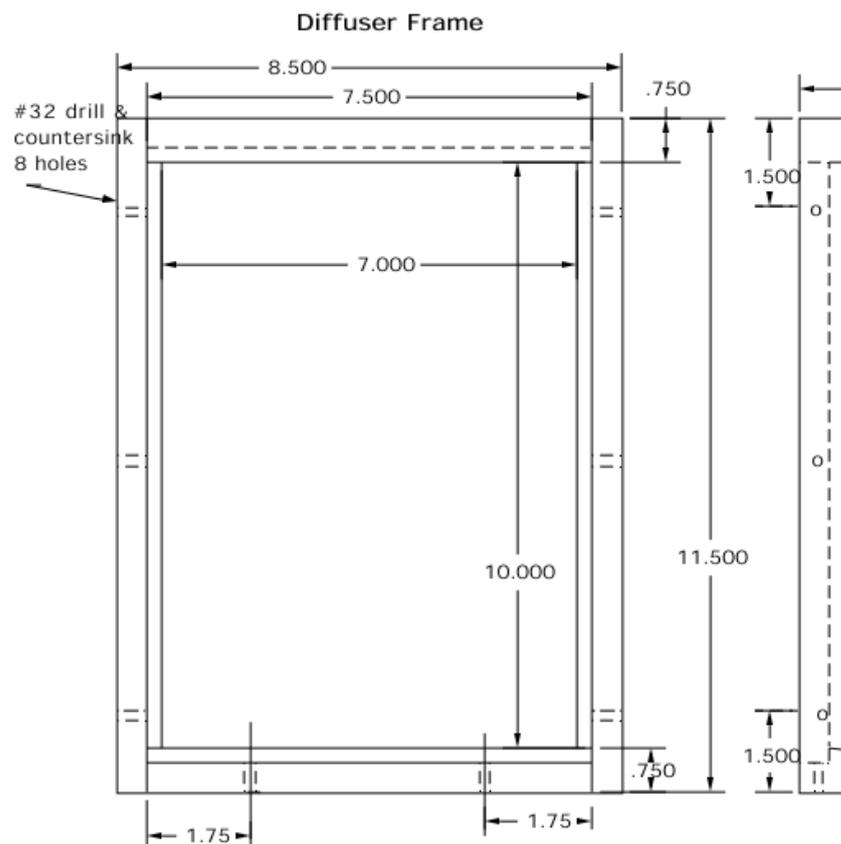
The Centerbody's function is to divert the air around the fan hub in a controlled manner so as to preclude and flow separation in the diffuser section. Since the aerodynamic loads on the centerbody are quite low, it can be made from very light weight materials such as Styrofoam. Cut the desired profile shape in block form on a band saw, then round off the square corners with a knife. Cut a 6 1/2 inch diameter disc of 1/4 inch plywood with a 2 inch hole bored in the center. Securely bond this disc to the flat end of the Styrofoam with a slurry of epoxy and micro balloons. The final round cross section can be achieved by sanding with coarse sandpaper. A strong, hard surface finish can be achieved by applying a thin layer of fiberglass cloth using epoxy. (Do not use polyester resin because it will destroy the Styrofoam). If a model safety screen is to be used (see below), it is important to add this layer of fiberglass so as to ensure a secure bond between the Styrofoam and the 1/4 inch plywood. A small 1 inch diameter by 2 inch deep cavity must be hollowed out of the foam to provide clearance for the fan hub. Mount the Centerbody on the tunnel centerline with about 1/8 inch clearance from the fan blades to the

Centerbody.

To mount the Centerbody, use two 1/4 inch wood rods. Drill four 1/4 inch holes horizontally through the diffuser sides such that each rod will pass through one diffuser side, through the Centerbody, and into the far diffuser side. Epoxy the rods to the diffuser sides and Centerbody. If the wind tunnel is to be used in a classroom environment, or you are worried about the possibility of a model going through the fan (with catastrophic results), a model safety screen can be added between the fan blades and the Centerbody. You will pay a slight penalty in maximum air speed, but the tunnel will be much safer in the event a model ever breaks loose. Cut the screen approximately 14 inches in diameter and securely attach it to the Centerbody with four #10 sheet metal screws and wood washers screwed into the 1/4 inch plywood.

FORCE PROBES AND BASE

To measure the "lift" and "drag" of the models in the testing section, we used two Force probes from Vernier Instruments (503) 297 5317. These probes are mounted horizontally and held by two clamps which fit vertically through a 1/2" thick Plexiglas base. The clamps we used were simply three fingered test tube holders which can be ordered from a chemical supply company. The base also holds a stepper motor that turns the model mount in 0.5o increments both clockwise and counterclockwise. The clamps should be mounted close to 5" from the motor shaft forming a 90° angle from each other. They can be held in place using thumbscrews twisted through a threaded Plexiglas sheath which is attached to the base. Legs should be added to the base to elevate the motor so that it doesn't vibrate. Simple plex rods can be glued in place for this purpose.



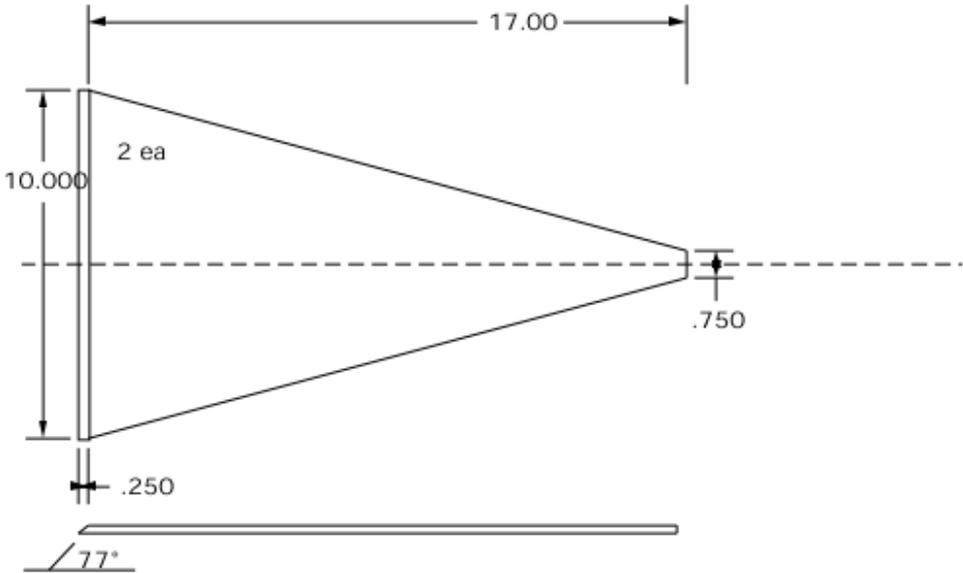
Notes:

- *Drill and countersink all screw holes prior to frame assembly.
- *Nail and glue each joint
- *Make sure all corners 90°
- *1/8" Radius on outside corners
- * plexiglass thickness = 1/4"
- *Plywood thickness= 1/4"

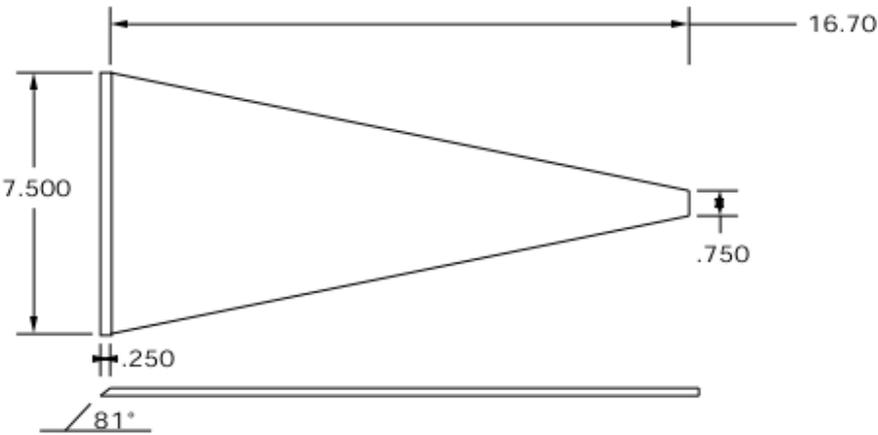
Material: 3/4 Hardwood

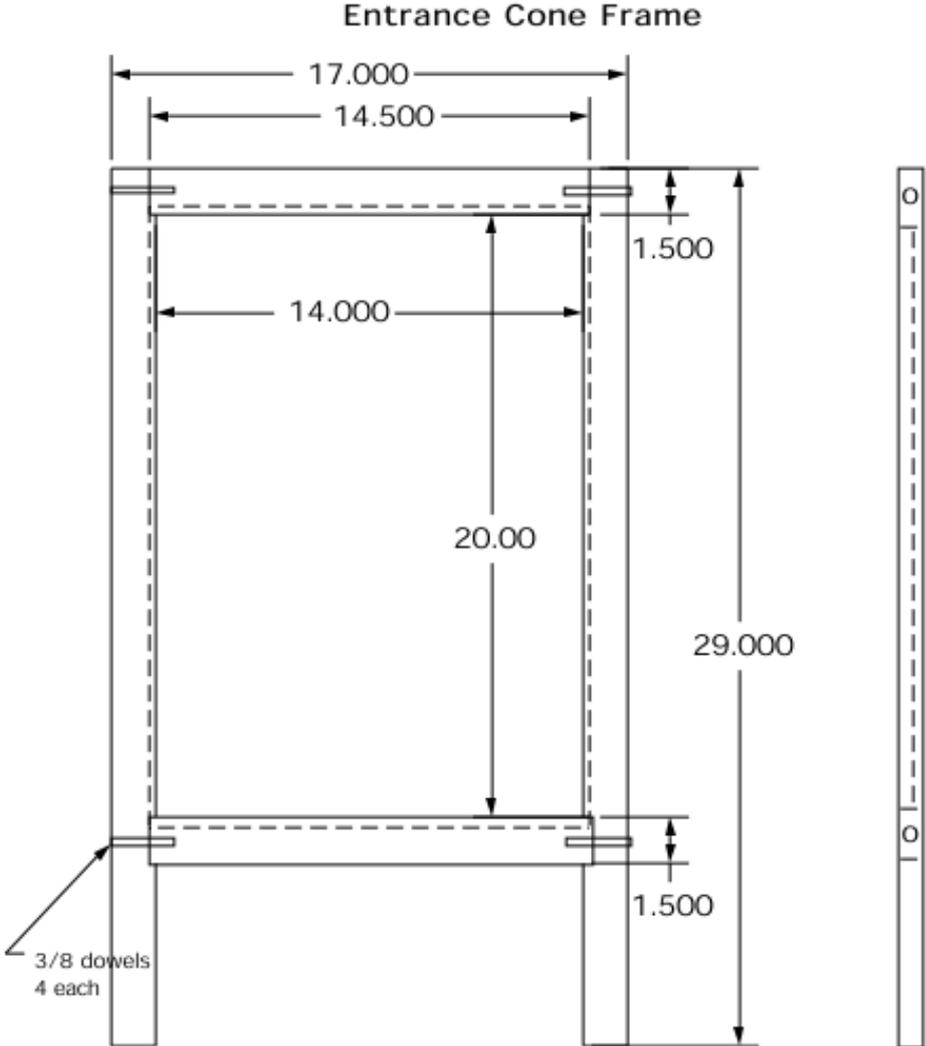
Diffuser Dimensions

TOP & BOTTOM



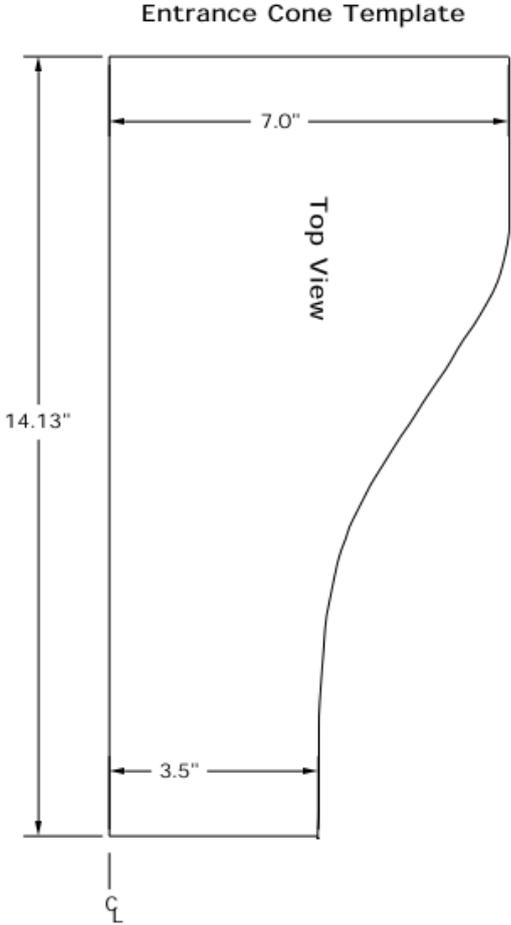
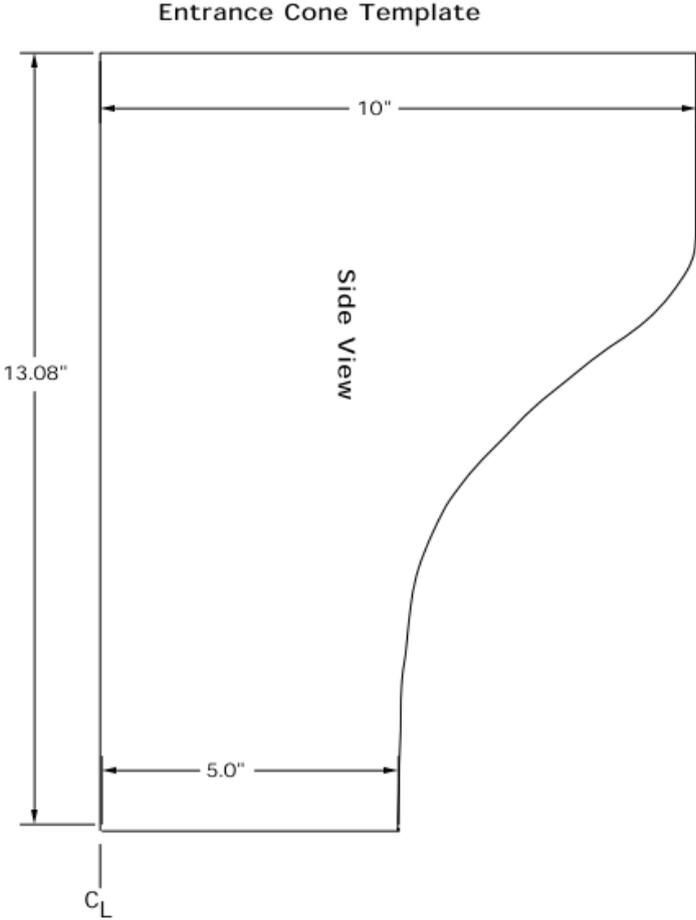
SIDES

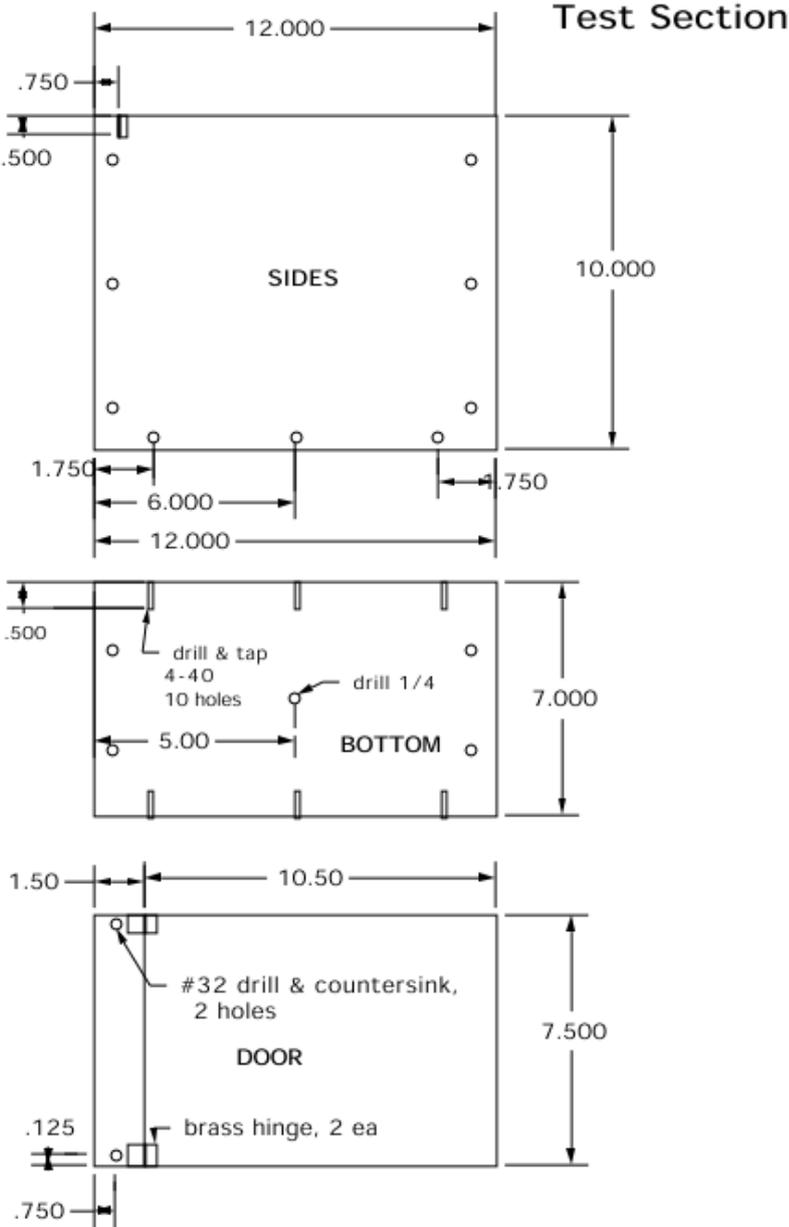




Note: Mirror image sides
Route 1/2" radius after assembly

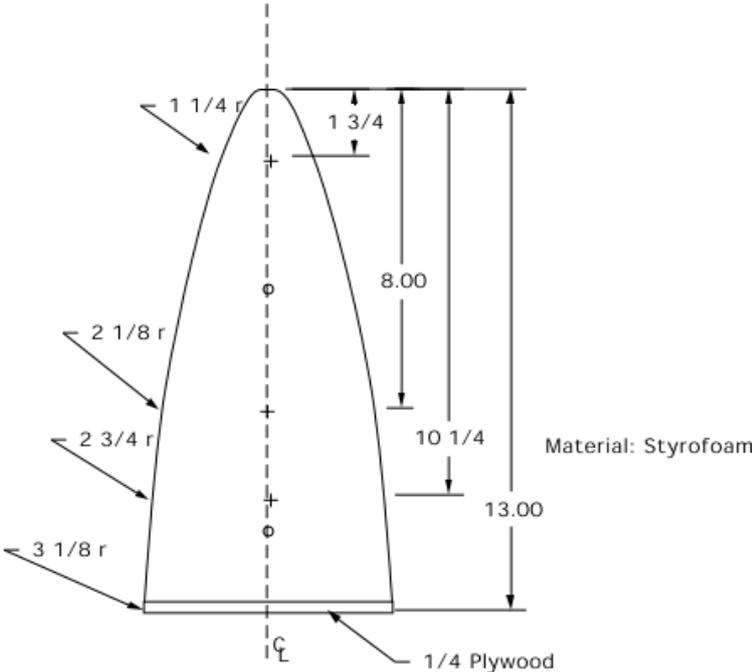
Material: 3/4" Hardwood



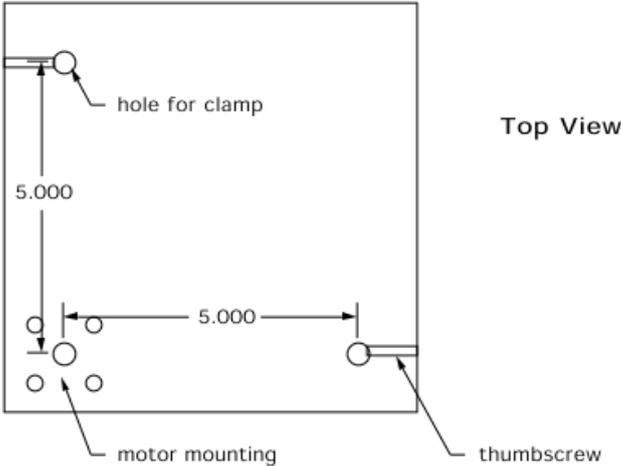


Material: 1/4" nlexic

Centerbody

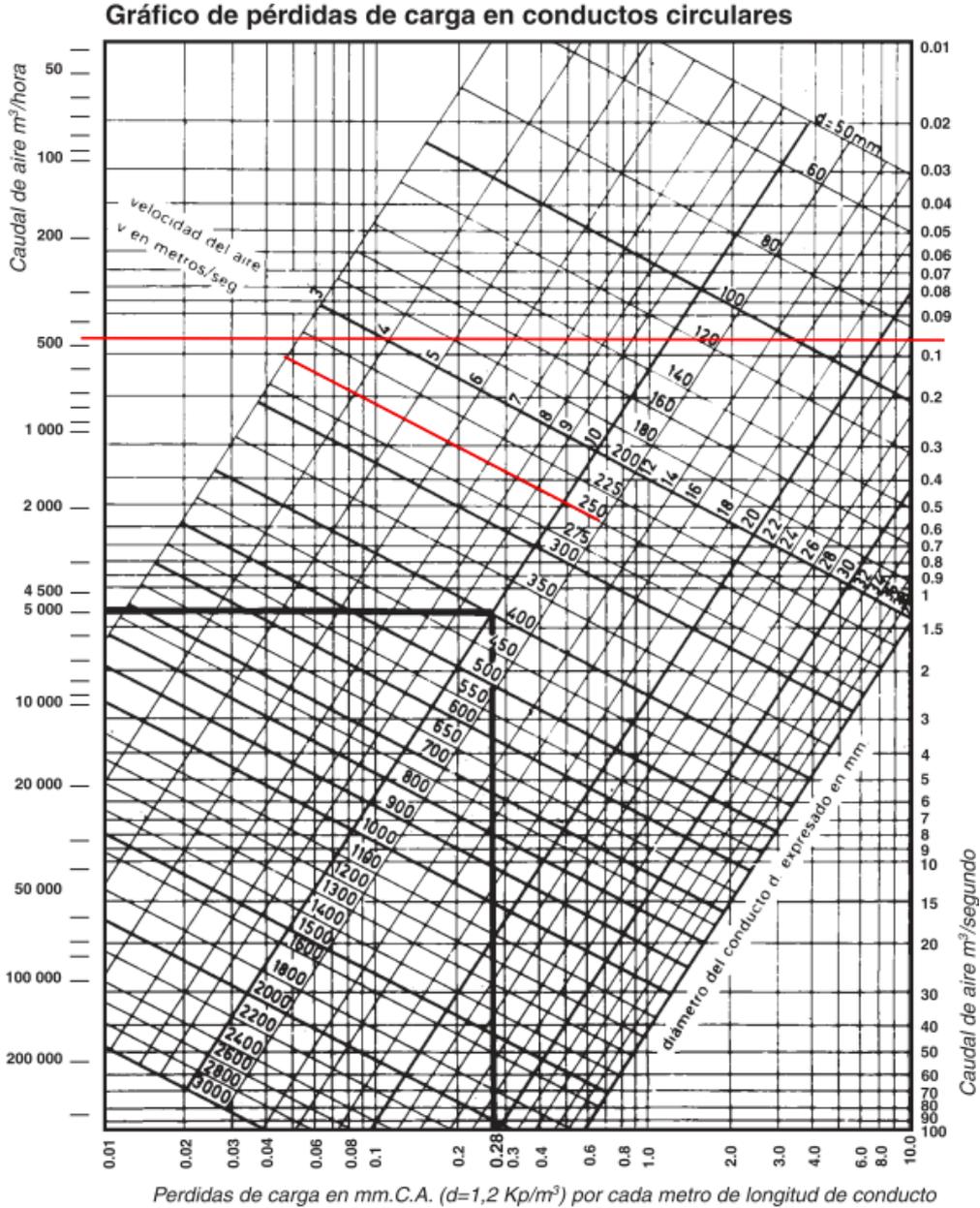


Base



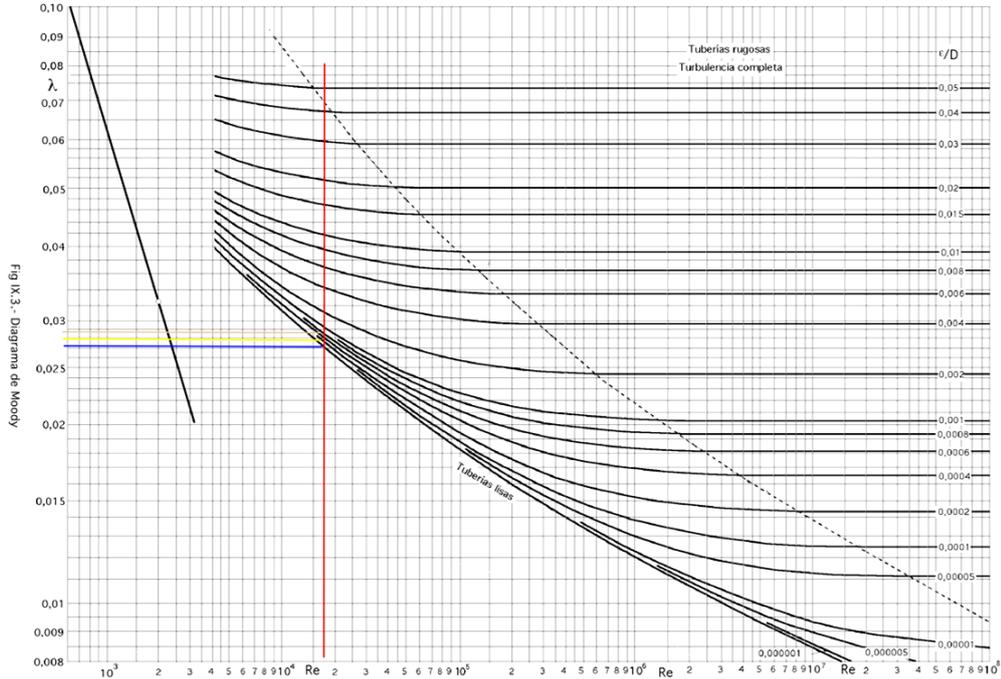
Fuente: <http://www.fi.edu/flights/first/makebigger/plans.pdf>

Anexo 2: Pérdidas de carga en conductos circulares.



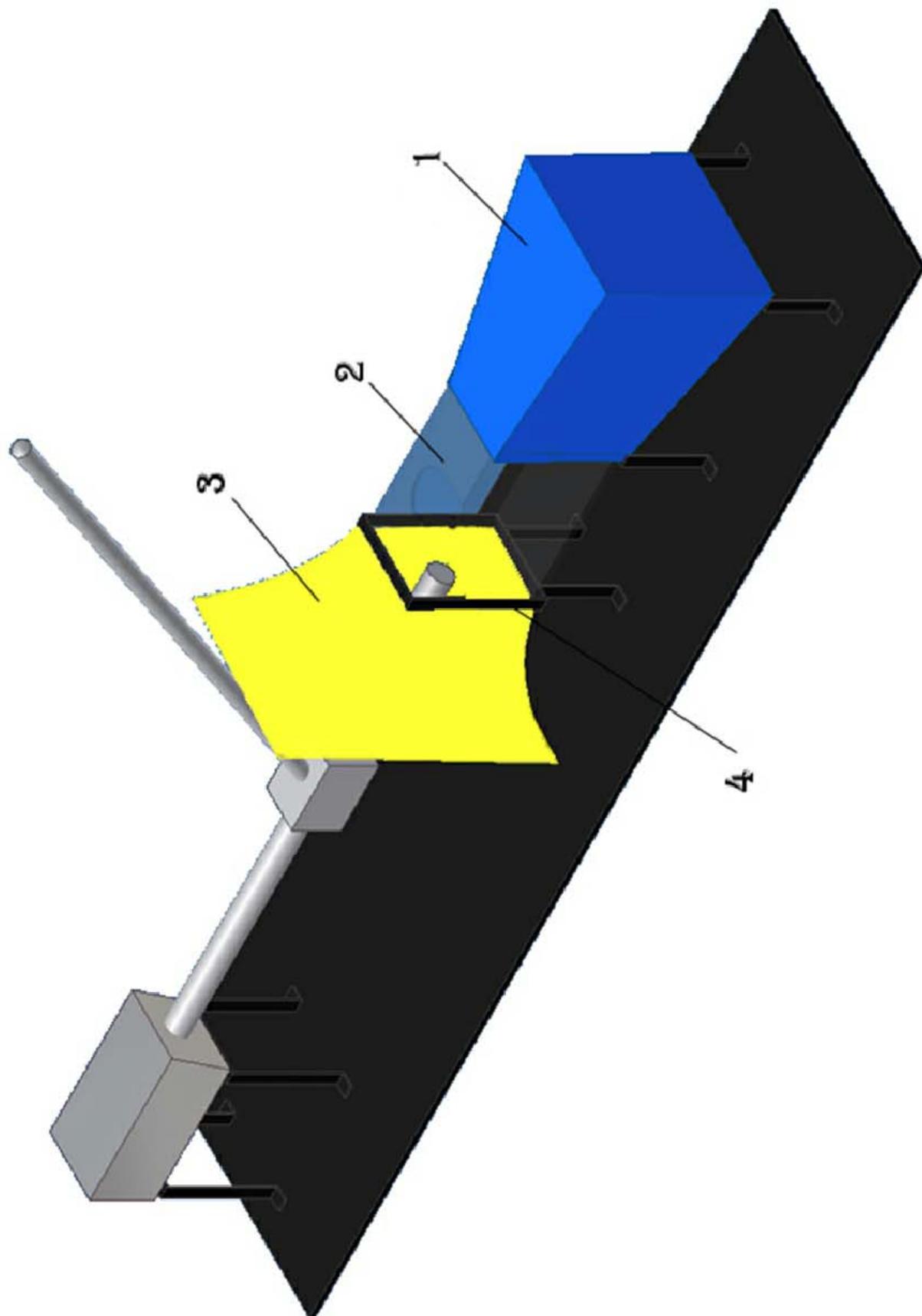
Fuente: 212.89.6.4:8080/Sodeca/pages/ficheros/IT_es.pdf

Anexo 3: Diagrama de Moody

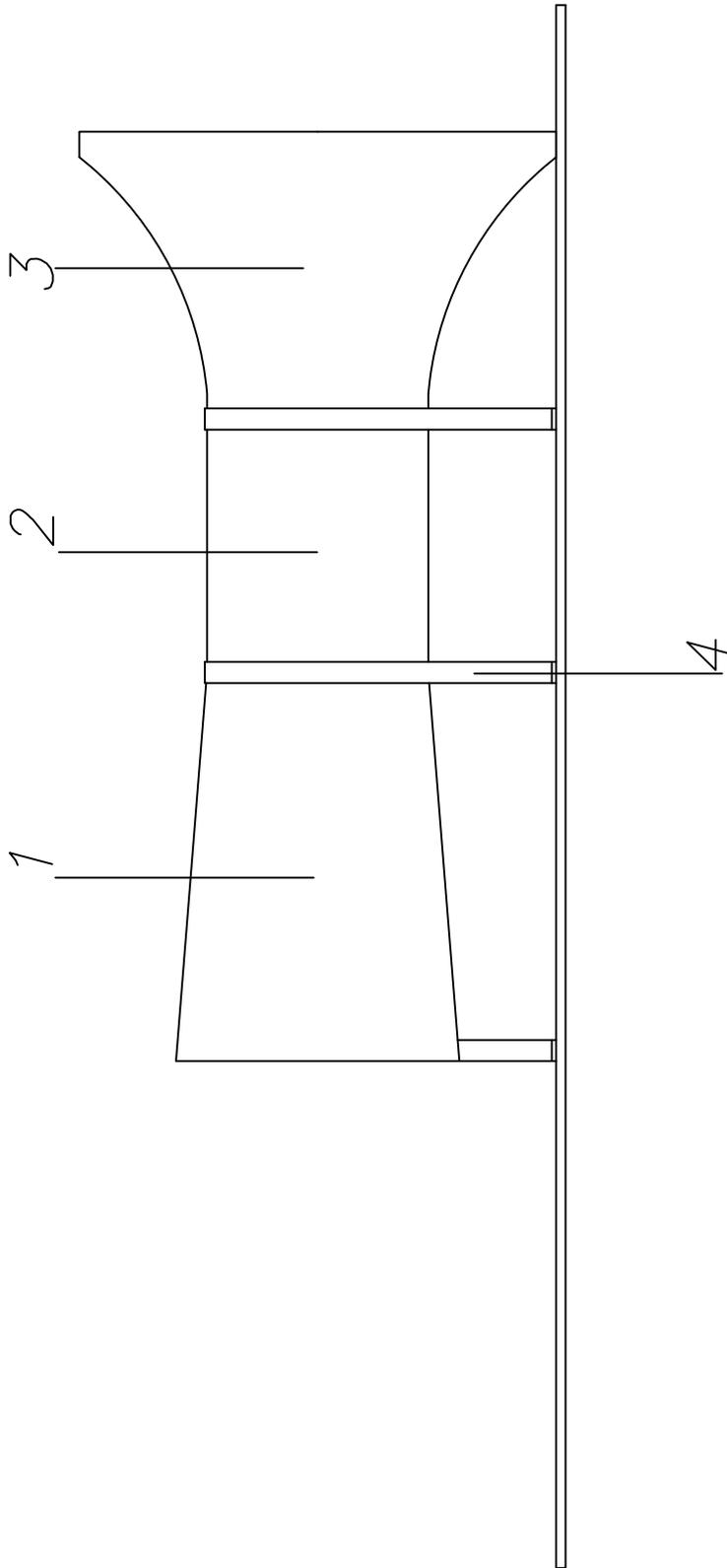


Fuente: Robert L. Mott, "Mecánica de fluidos aplicada", 1996.

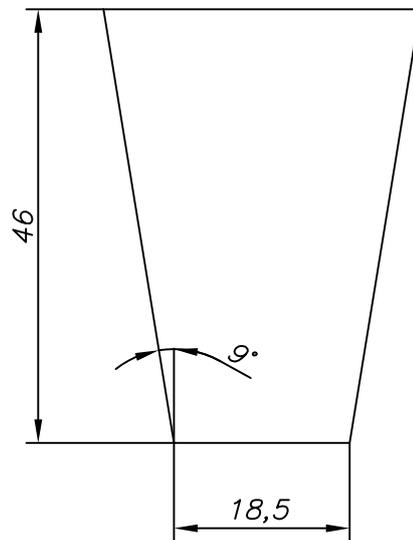
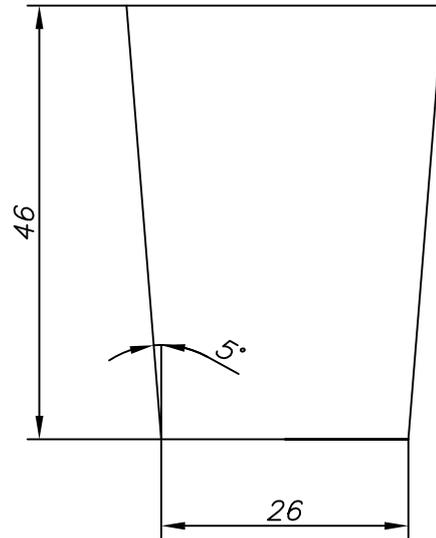
Anexo 4: Planos técnicos



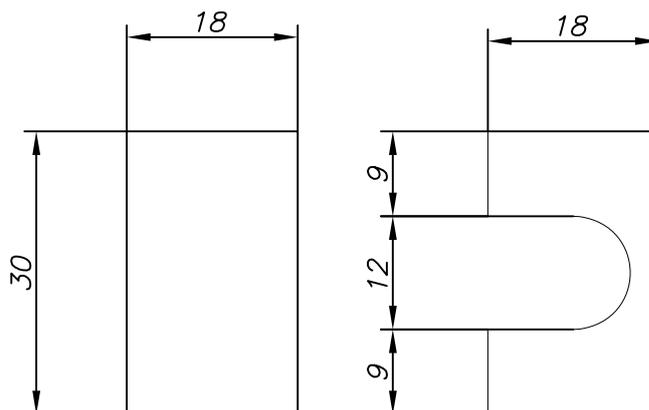
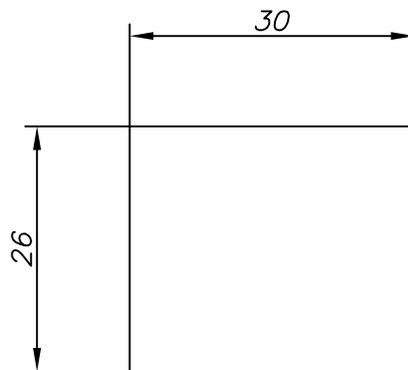
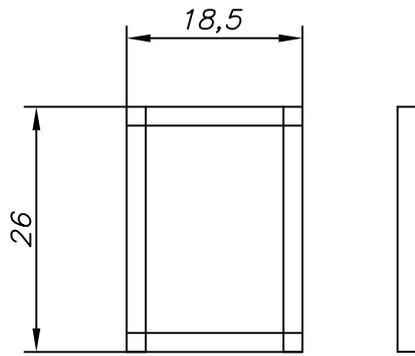
POS.	CANT.	DENOMINACION	NORMA	MATERIAL	NOTAS
		<i>Vista Isometrica</i>			
Escala:		Fecha: 05-Marzo-2011	 UNIVERSIDAD DEL AZUAY FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA		
TUNEL DE VIENTO DIDACTICO					
		Dibujó: Miguel Goercke León.		N-: 1	
		Especialidad: Ing. Automotriz.			



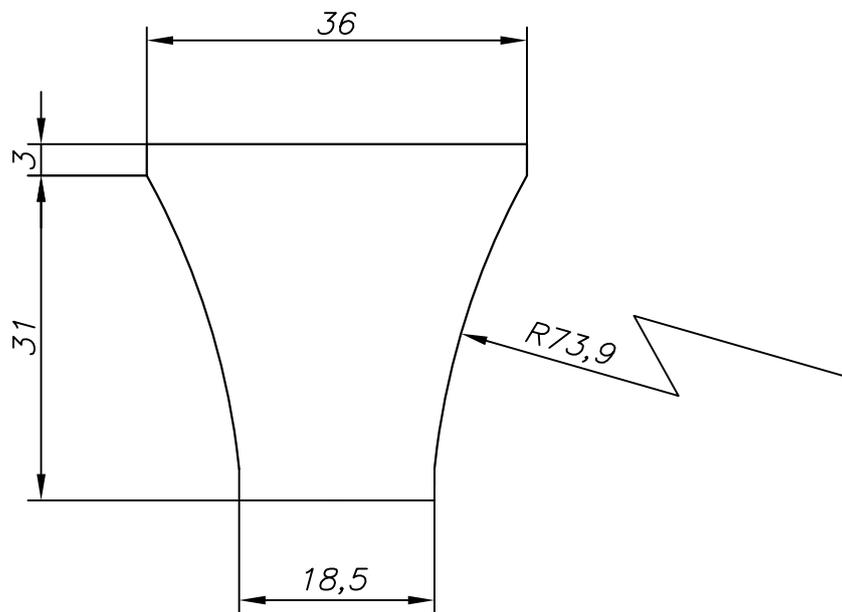
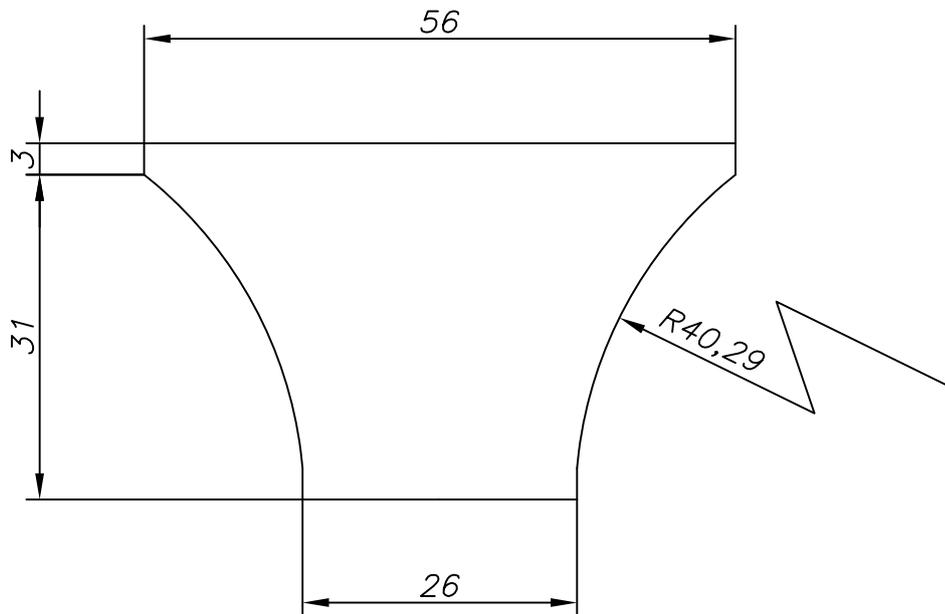
POS.	CANT.	DENOMINACION	NORMA	MATERIAL	NOTAS
		<i>Vista Lateral</i>			
Escala:		Fecha: 05-Marzo-2011	 UNIVERSIDAD DEL AZUAY FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA		
TUNEL DE VIENTO DIDACTICO					
			Especialidad: Ing. Automotriz.	N-: 2	



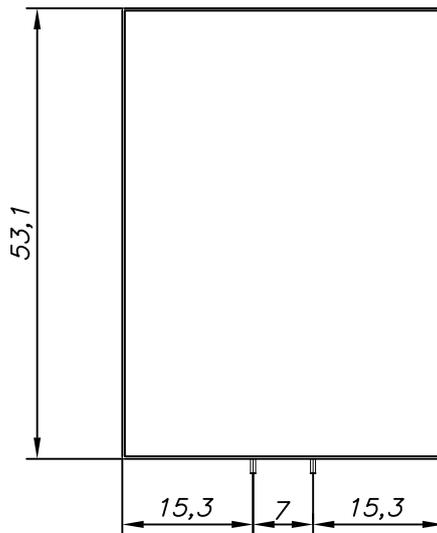
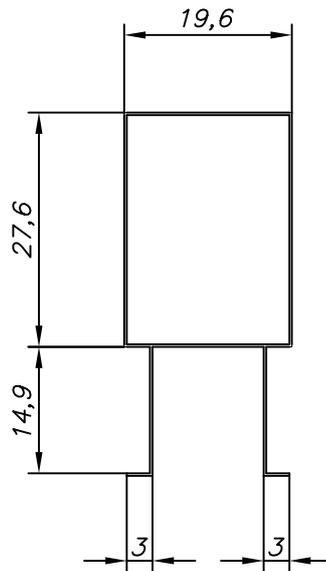
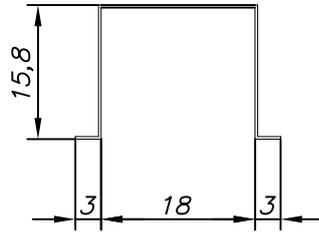
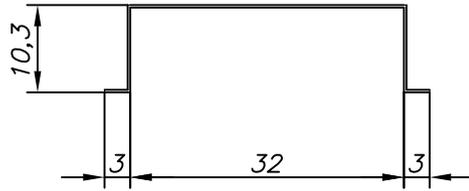
POS. 1	CANT. 2	DENOMINACION <i>Difusor</i>	NORMA	MATERIAL Madera	NOTAS
Escala:		Fecha: 05-Marzo-2011	 UNIVERSIDAD DEL AZUAY FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA		
TUNEL DE VIENTO DIDACTICO					
			Especialidad: Ing. Automotriz.	N-: 3	



POS. 2	CANT. 1	DENOMINACION <i>Sección de Prueba</i>	NORMA	MATERIAL Perfil Aluminio 1" Vidrio 4 mm	NOTAS
Escala:		Fecha: 05-Marzo-2011	 UNIVERSIDAD DEL AZUAY FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA		
TUNEL DE VIENTO DIDACTICO					
			Especialidad: Ing. Automotriz.	N-: 4	



POS.	CANT.	DENOMINACION	NORMA	MATERIAL	NOTAS
3	1	<i>Cono de Contracción</i>		Fibra de Vidrio	
Escala:		Fecha: 05-Marzo-2011	 UNIVERSIDAD DEL AZUAY FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA		
TUNEL DE VIENTO DIDACTICO					
Especialidad: Ing. Automotriz.				N-: 5	



POS.	CANT.	DENOMINACION	NORMA	MATERIAL	NOTAS
4	1	<i>Soportes</i>		Platina de Acero 1"	
Escala:		Fecha: 05-Marzo-2011	 UNIVERSIDAD DEL AZUAY FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA		
TUNEL DE VIENTO DIDACTICO					
			Especialidad: Ing. Automotriz.	N-: 6	