



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE
VIENTO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

FÍSICA

P R E S E N T A:

ALUMNA: ANDREA BURGOS CUEVAS

DIRECTORA DE TESIS: DRA. CATALINA ELIZABETH
STERN FORGACH

2014.





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A la Dra. Catalina Stern Forgach por brindarme la valiosa oportunidad de trabajar en el Taller de Hidrodinámica y Turbulencia. Por su amable orientación, paciencia, apoyo y amistad durante los últimos años de mi carrera y sobretodo durante la realización de este trabajo. Gracias por enseñarme a disfrutar del estudio de los fluidos y por guiarme en el mismo.

A mis padres Guillermo Burgos y Alicia Cuevas por siempre cuidar que lograra tener la educación que hoy celebro y por preocuparse de que ésta me hiciera feliz. Gracias por el tiempo, por la educación y por el gran apoyo que ambos me han dado a lo largo de toda mi vida. Gracias por verme crecer de la mejor manera posible cada día.

A Omar Recillas por su incondicional apoyo y compañía. Gracias por llenarme de sonrisas tantas veces y por escucharme y acompañarme en los momentos difíciles. Gracias por el cariño y por ser mi gran compañía, recorriendo conmigo este camino durante los últimos años. Gracias por ser también mi inmejorable compañero de trabajo sin el cual este túnel de viento no habría podido construirse; gracias por compartir conmigo conocimientos y habilidades; ayudándome y motivándome a ser mejor día con día.

A mi hermana Cecilia Burgos por sus consejos y su compañía. Por compartir conmigo esta vida y enseñarme a disfrutarla más. Gracias por su apoyo en muchos momentos importantes.

A Ana Abarca por ser una tan gran amiga, por inspirarme siempre tanta confianza y brindarme un enorme apoyo. Gracias por enseñarme que una amistad adolescente llega a ser una amistad valiosísima para toda la vida y por todos los gratos momentos compartidos. Gracias a

Yadira Salazar, tanto por su grata amistad que me alegra los días, como por la ayuda y consejos académicos que siempre me brinda; haciéndome recordar la belleza de la física. Gracias a Abigail Trujillo por acompañarme a lo largo de esta etapa y provocar que las noches de desvelo estudiando se volvieran muy amenas; gracias también por la valiosa amistad brindada durante estos últimos años.

A Norma, Armando y Francisco Ayala, quienes brindaron su apoyo desinteresado durante la realización de este trabajo; contribuyendo activamente con la mejor de las intenciones y logrando facilitar la ejecución del mismo. Gracias a Norma y a Roberto y Andrea Recillas por permitirnos disponer de sus espacios y por su apoyo y compañía tanto en la construcción del túnel de viento como a lo largo de los últimos años.

A Sergio Cuevas por inspirarme a continuar por este científico camino, por su apoyo y cariño tanto en mi carrera como a lo largo de toda mi vida. Gracias también a mis abuelos Arturo Cuevas y Marta García y a mi tía Socorro Serreteño por su cariño, compañía y apoyo desde que nací hasta el momento.

A Ángel Ruiz, Roberto Zenit, Sergio Hernández y Carlos Palacios por motivarme en momentos importantes de mi carrera. Gracias por sus enseñanzas y por darse el tiempo de conocer este trabajo.

Índice general

Agradecimientos	2
Introducción	5
Capítulo 1. Principios básicos	7
1.1. Mecánica de fluidos para un túnel de viento	7
1.2. Pérdidas de energía en un túnel de viento subsónico	17
1.3. Principios de medición en un túnel de viento	20
Capítulo 2. Diseño de un túnel de viento	24
2.1. Diseño de la zona de prueba	24
2.2. Diseño de la cámara de asentamiento	27
2.3. Diseño del cono de contracción	30
2.4. Diseño del difusor	37
2.5. Diseño de la zona de extracción	41
Capítulo 3. Construcción de un túnel de viento	46
3.1. Construcción de la cámara de asentamiento	46
3.2. Construcción del cono de contracción	53
3.3. Construcción del difusor	57
3.4. Construcción de la zona de prueba	60
3.5. Ensamblaje del túnel de viento	62
Capítulo 4. Mediciones y visualizaciones en el túnel de viento	64
4.1. Velocimetría con un anemómetro de veleta	64
4.2. Visualizaciones con humo	69
Conclusiones	77
Bibliografía	80

Introducción

Son muchos los ejemplos de objetos, animales o nosotros mismos moviéndonos dentro de un fluido. Sin embargo para estudiar estos casos en el laboratorio, resulta más conveniente tener al objeto en cuestión en reposo, lo que implica que el fluido deba moverse con respecto a él. Para esto se utilizan túneles de viento o de agua, los cuales tienen el propósito de proveer un flujo laminar en la zona en la que coloquemos al objeto de interés. El hecho de no contar con un túnel de viento óptimo para ciertos experimentos en la Facultad de Ciencias de la U.N.A.M. fue lo que motivó la realización del presente trabajo.

El objetivo de este trabajo es claro: diseñar y construir un túnel de viento capaz de proveernos un flujo adecuado para estudiar objetos en él. Con esto queremos decir que sea posible obtener información acerca de características como el arrastre, la sustentación y la capa límite del objeto en el flujo; así como de los campos de velocidad y de presión. Para el diseño del túnel de viento nos hemos dado a la tarea de revisar los antecedentes al respecto. Dado que la utilización de estos dispositivos no se limita a propósitos meramente científicos, ya que es de gran utilidad en industrias como la automovilística y la aeronáutica; el cómo realizar un buen túnel de viento ya ha sido estudiado.

Al revisar la bibliografía al respecto encontramos que los primeros antecedentes de flujos provocados para visualizarse alrededor de objetos, datan del siglo XVIII [1]. Fue entonces cuando un matemático inglés llamado Benjamin Robins empezó a utilizar un brazo giratorio para producir un flujo gracias al cual podía medir el arrastre y la sustentación de diferentes alas. Pronto se dieron cuenta de que un dispositivo más adecuado sería de gran utilidad en este tipo de estudios. Con esto nació la idea de un pasaje cerrado cuyo aire sería movido por

un ventilador. A esto se le llamó túnel de viento, el cual tendría como sección principal a la zona de prueba, pues en ella se llevaría a cabo el estudio del objeto en el flujo.

El primer túnel de viento fue creado en 1871 por Frank H. Wenham, quien introducía objetos de distintas formas en su túnel y también era capaz de medir el arrastre y la sustentación [2]. Después de Wenham otros siguieron su ejemplo, perfeccionando los túneles de viento y dándose cuenta de que, para obtener un flujo más adecuado en la zona de prueba, era mejor que el túnel fuera de extracción y no de inyección, además debía constar de distintas partes cuyos parámetros se estudiarán a detalle en este trabajo para el caso de un túnel de viento abierto y de baja velocidad (no supersónica). La idea será ajustar las secciones del túnel, para que el flujo dentro de él sea el adecuado y podamos cubrir las necesidades de distintos experimentos que se realizan en la Facultad de Ciencias. Además se inicia la caracterización del túnel y se mencionan algunos ejemplos de objetos visualizándose dentro de él.

Capítulo 1

Principios básicos

1.1. Mecánica de fluidos para un túnel de viento

Un túnel de viento se construye tomando en cuenta el tipo de experimentos que se quiera realizar dentro de él. Esto conlleva a consideraciones de tamaño, velocidad y precisión. La mayoría de los experimentos para los que se utilizará este túnel tendrán propósitos didácticos, pues sus principales usuarios serán los alumnos de la Facultad de Ciencias. Sin embargo, no debe dejarse de lado la posibilidad de realizar experimentos con fines de investigación (que requieran de una mayor precisión y una menor turbulencia) y por ello se tratará de diseñar de manera que el flujo en su zona de prueba sea laminar y esté bien caracterizado. Así será posible hacer visualizaciones y mediciones precisas cuando se requiera.

Es importante que la sección transversal del túnel no sea constante, sino que tenga una contracción antes de la zona de prueba y una expansión que vaya de la zona de prueba al extractor. El propósito de ello es obtener un flujo laminar controlado. El túnel de viento a realizar consistirá de las siguientes secciones, cuyas características específicas se optimizarán utilizando nociones de mecánica de fluidos y con base en trabajos previos:

Cámara de asentamiento: en la cual hay uno o varios retículos para laminarizar el flujo.

Cono de contracción: es la sección que guía al flujo acelerándolo y disminuyendo la intensidad de la turbulencia. Es la conexión entre la cámara de asentamiento y la zona de prueba.

Zona de prueba: es la de mayor interés, pues en ella se estudiará el flujo; las demás secciones se diseñan para que en la zona de prueba se produzca el flujo requerido, en ella la sección transversal es constante.

Difusor: es una expansión que conecta a la zona de prueba con el extractor y evita que los vórtices producidos afecten el flujo de interés.

Extractor: produce el gradiente de presión que genera el flujo en el túnel de viento.

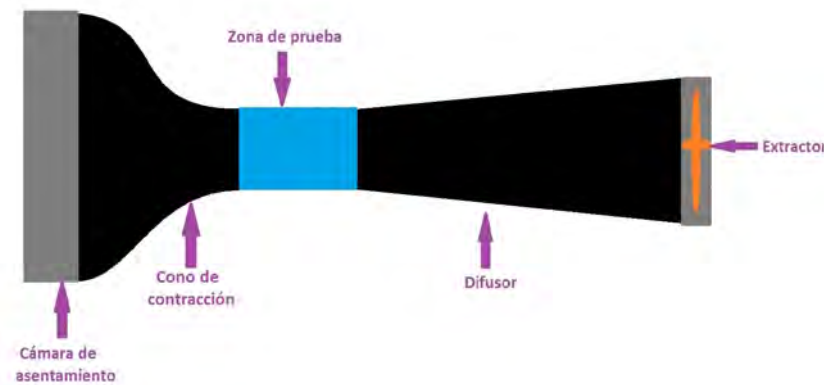


FIGURA 1.1.1. Esquema que muestra las secciones principales de un túnel de viento subsónico y abierto.

Existen túneles de viento cerrados y abiertos. Los cerrados tienen un pasaje que conecta al extractor con la cámara de asentamiento. De esta forma se crea un circuito cerrado en el cual el aire recircula a lo largo del túnel. Los túneles de viento abiertos no tienen conexión entre el extractor y la cámara de asentamiento. El túnel de viento correspondiente al presente trabajo es abierto, por lo que no tiene lo que se conoce como “pasaje de retorno”. En la figura (1.1.1) se observa un esquema de la estructura a grandes rasgos de un túnel de viento subsónico y abierto.

Como se ha visto hasta ahora el principal objetivo del túnel de viento es que el flujo en la zona de prueba sea laminar y esté bien caracterizado para que los experimentos realizados sean confiables. Es importante, por lo tanto, considerar la dinámica del flujo dentro del túnel. A continuación se mencionan algunos principios importantes en el estudio de la mecánica de fluidos.

1.1.1. Ecuaciones de conservación de masa y momento.

En cualquier sistema físico hay conservación de masa y momento¹. Las ecuaciones que expresan estos principios de conservación constituyen la primera herramienta matemática para entender el flujo dentro del túnel de viento y por lo tanto para diseñarlo de la mejor manera posible.

Cuando se trata de un fluido, los principios de conservación de masa y momento no se escriben de la misma forma que para un cuerpo rígido, pues deben tomarse en cuenta las deformaciones. Esto conlleva a que en vez de hablar de conservación, se hable de balance de masa y momento. La ecuación básica que da cuenta del principio de conservación de masa es la de continuidad (1.1.1), que se puede plantear tanto en un marco de referencia lagrangiano (estudiando a una partícula específica) como en uno euleriano (estudiando un punto fijo). Para pasar del marco de referencia lagrangiano al euleriano, se utiliza la llamada derivada material: $\frac{DX}{Dt} = \frac{\partial X}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)X$ donde X es cualquier propiedad del fluido. La ecuación de continuidad en términos eulerianos se escribe:

$$(1.1.1) \quad \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

donde ρ es la densidad del fluido y \mathbf{v} el vector velocidad. Si el flujo es incompresible, entonces la densidad no cambia con el tiempo y la ecuación de continuidad se simplifica:

$$(1.1.2) \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0.$$

Un flujo se clasifica en subsónico y supersónico, según su velocidad. El parámetro mediante el cual se lleva a cabo esta determinación se llama número de Mach, y se define como la relación entre la velocidad de un fluido v y la velocidad del sonido en dicha sustancia c , ($M \equiv \frac{v}{c}$). Un flujo es subsónico si el número de Mach es menor que la unidad, es sónico si $M = 1$, es supersónico si excede el valor de la unidad y es hipersónico si M es mucho mayor a uno. El número de Mach además puede cuantificar si un flujo es compresible o incompresible; en general

¹También hay conservación de energía interna en un sistema físico. Sin embargo para los propósitos de este trabajo, al no haber intercambio de calor y realizarse todos los cálculos a temperatura constante, no resulta necesario tomar en cuenta la conservación de energía interna, por lo que se omite.

para $M \leq 0.3$ el flujo será considerado incompresible. Como en ninguna sección del túnel de viento la velocidad es elevada, siempre se cumplirá que dentro de éste $M \leq 0.3$, por lo que el flujo será incompresible y siempre será válido utilizar la ecuación (1.1.2) en el presente trabajo.

Por otro lado las ecuaciones correspondientes a la conservación de momento en un fluido incompresible y homogéneo y de viscosidad constante son las de Navier-Stokes:

$$(1.1.3) \quad \rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \rho \mathbf{f} - \nabla p + \frac{1}{2} \mu \nabla^2 \mathbf{v}.$$

Esta ecuación vectorial, escrita en términos eulerianos, puede obtenerse a partir de la segunda ley de Newton $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, cuando se considera un fluido sometido a fuerzas tanto de cuerpo (aplicadas por un campo externo como el gravitacional o uno eléctrico y que actúan sobre todo el fluido) como de superficie (aplicadas por esfuerzos externos en los lados de un elemento de fluido). Los esfuerzos viscosos que dependen de la viscosidad μ y la presión p actúan en las superficies del flujo, por lo tanto los términos que las contienen en la ecuación (1.1.3) constituyen las fuerzas de superficie. Por otro lado las fuerzas de cuerpo en la misma ecuación se engloban en el término $\rho \mathbf{f}$. En el presente trabajo la única fuerza de cuerpo será la gravitacional, por lo que se podrían resumir todas las fuerzas de este tipo en el término $\rho \mathbf{g}$.

La ecuación vectorial (1.1.3) se puede escribir como tres ecuaciones diferenciales escalares acopladas no lineales bastante complicadas ya que los vectores dependen de tres coordenadas espaciales y del tiempo. Las ecuaciones de Navier-Stokes se pueden resolver analíticamente sólo en casos particulares. En la práctica muchas veces se hacen simplificaciones mediante un análisis dimensional para poder resolverlas.

Lejos de cualquier superficie se puede despreciar la viscosidad del aire. Se obtiene entonces la ecuación de Euler que, asumiendo que la gravedad es la única fuerza de cuerpo, se escribe:

$$(1.1.4) \quad \frac{Dv}{Dt} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p.$$

La ecuación (1.1.4) puede ser integrada para un flujo estacionario sobre una línea de corriente, obteniéndose:

$$(1.1.5) \quad -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{dz}{ds} = V \frac{\partial V}{\partial s},$$

donde ds es el desplazamiento de una partícula de fluido a lo largo de la línea de corriente; al integrar 1.1.5, se obtiene la ecuación de Bernoulli:

$$(1.1.6) \quad \frac{p}{\rho} + gz + \frac{V^2}{2} = \text{constante}.$$

Esta ecuación se puede reescribir de manera equivalente como $p + gz\rho + \frac{1}{2}\rho v^2$, donde el término $q = \frac{1}{2}\rho v^2$ corresponde a la energía cinética por unidad de volumen de una partícula de fluido y se conoce como la presión dinámica; para diferenciarla de la presión estática p que concuerda con la presión termodinámica y es la que se mediría en un sistema de referencia que se desplaza con el fluido.

1.1.2. Viscosidad y capa límite.

La ecuación (1.1.6) sólo es válida cuando se cumplen las condiciones especificadas anteriormente, a saber, flujo incompresible, estacionario, no viscoso y a lo largo de una línea de corriente. Sin embargo es muy útil porque relaciona los cambios en presión con los cambios de velocidad y de nivel a lo largo de una línea de corriente. Gracias a ella se pueden hacer predicciones simples acerca de un flujo que cumpla las condiciones requeridas.

La suposición de que la viscosidad (del aire en este caso) es despreciable, resulta razonable para el flujo lejos de una superficie sólida; pero no lo es para el flujo en contacto con ella. En el caso del túnel de viento, las superficies serán sus paredes. El hecho de usar o no la simplificación anterior se ha estudiado, desde que Prandtl lo sugirió en 1904, dividiendo al flujo en dos regiones: la capa límite (que es una región delgada del fluido, cercana al sólido en la que los efectos viscosos son considerables) y la zona lejos de la superficie sólida en la cual se pueden despreciar los efectos viscosos.

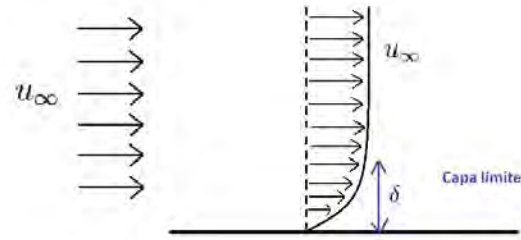


FIGURA 1.1.2. Se observa un esquema de la capa límite formada cerca de una superficie sólida. El grosor de desplazamiento se denota como δ y la velocidad máxima del flujo es u_∞ .

Se considera que el flujo lejos de la superficie alcanza su máxima velocidad denotada por u_∞ . En el flujo que se encuentra cerca de la superficie sólida, las líneas de corriente se ven desplazadas, por acción de la viscosidad, una distancia δ , a la cual se le llama grosor de desplazamiento. Esto conlleva a que la velocidad del flujo disminuya en zonas cercanas a la superficie. Se considera que la capa límite abarca desde la superficie sólida hasta el punto en el que la velocidad del flujo es $0.95u_\infty$. En la figura (1.1.2) estos conceptos quedan más claros.

1.1.3. Flujos rotacionales e irrotacionales.

Hasta ahora no se ha especificado si las partículas de fluido siguen una dirección fija o están rotando. La rotación ω de una partícula de fluido es una cantidad vectorial y se define como la velocidad angular promedio de dos segmentos cualesquiera en la partícula mutuamente perpendiculares. Está relacionada con el vector velocidad pues corresponde precisamente a su rotacional. Un flujo irrotacional es aquél en el que no existe rotación: $\omega = \nabla \times \mathbf{V} = 0$. Por otro lado un flujo rotacional será uno en el cual ω no se anule y las partículas de fluido sí estén rotando.

Para estudiar un flujo irrotacional se puede definir una función potencial ϕ . Para ello es preciso recordar que, cuando ϕ es cualquier función escalar de las coordenadas espaciales y del tiempo y tiene primeras

y segundas derivadas continuas, se cumple que $\nabla \times (\nabla \phi) = 0$. Entonces para un flujo irrotacional debe existir una función escalar tal que su gradiente sea igual al vector velocidad. Con el propósito de que la dirección positiva del flujo esté en el sentido en el que disminuye ϕ , frecuentemente se agrega un signo menos, resultando que $\mathbf{V} = -\nabla \phi$.

1.1.4. Flujos turbulentos.

Como ya se ha dicho, los flujos viscosos se pueden clasificar en laminares o turbulentos dependiendo de cómo sea su estructura interna. En un régimen laminar la estructura del flujo tiene un movimiento de láminas o capas. En cambio en un régimen turbulento las partículas de fluido tienen movimientos tridimensionales aleatorios superpuestos al movimiento promedio. Lo que entra en juego para propiciar la laminaridad o turbulencia de un flujo son principalmente dos fuerzas: la inercial $F_{in} = \rho V^2 L$ y la viscosa $F_{vis} = \mu V L$. Al hacer el cociente entre ambas fuerzas se obtiene el parámetro adimensional llamado número de Reynolds:

$$(1.1.7) \quad Re = \frac{\rho V L}{\mu},$$

donde μ es la viscosidad y L la distancia característica. El numerador del número de Reynolds corresponde a la fuerza inercial, la cual le confiere al flujo de energía cinética, haciendo más probable que se presenten movimientos aleatorios. La viscosidad en el denominador actúa como estabilizador del flujo ya que es una especie de fricción gracias a la cual la energía cinética se puede transformar en calor; esto propicia el movimiento más “ordenado” en capas que hace que el flujo sea laminar.

El número de Reynolds resulta ser ampliamente usado para determinar si un flujo es laminar o turbulento. Se dice que para $Re \leq 2300$ el flujo es laminar, mientras que para $Re \geq 2300$ es turbulento. Sin embargo las condiciones del lugar en el que se presente el flujo pueden afectar el número de Reynolds para el cual se presente la transición de flujo laminar a turbulento.

El flujo dentro de la capa límite puede ser también laminar o turbulento. Las definiciones de flujo laminar y turbulento dadas anteriormente se aplican también a este caso. Las características del flujo pueden ser significativamente diferentes dependiendo de que la capa límite sea laminar o turbulenta.

Como la mecánica de fluidos turbulenta puede ser estudiada como un proceso aleatorio, los campos de velocidad ² en un flujo turbulento se describen y se analizan comunmente usando nomenclatura proveniente de procesos estocásticos y de variables aleatorias. Por ello las variables características de un flujo turbulento frecuentemente se especifican en términos de sus momentos. En particular una cantidad de un campo turbulento u , se separa comunmente en su primer momento \bar{u} y sus fluctuaciones turbulentas u' . Esta separación se conoce como la descomposición de Reynolds:

$$(1.1.8) \quad u(t) = \bar{u} + u'(t).$$

Cabe mencionar que el primer momento puede verse como un promedio temporal; si u es una velocidad \bar{u} es la velocidad media y se define como:

$$(1.1.9) \quad \bar{u} = \int_t^{t+T} u(t) dt.$$

Aunque un flujo turbulento obedece instantáneamente las ecuaciones de Navier-Stokes (1.1.3); resulta imposible predecirlo con mucho detalle si tiene un número de Reynolds muy alto. Se obtienen ecuaciones de movimiento para el estado promedio del flujo, agregando las contribuciones de las fluctuaciones turbulentas como una correlación de las fluctuaciones de las componentes de la velocidad.

²En general pueden ser campos no sólo de velocidad sino también de presión y temperatura.

Al sustituir la velocidad media en una de las ecuaciones Navier-Stokes sin fuerza de cuerpo externa, se obtiene.

$$(1.1.10) \quad \frac{\partial(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i + u'_i)(\bar{u}_j + u'_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_j^2}.$$

Promediando temporalmente, desarrollando y haciendo consideraciones tanto algebraicas como físicas, a saber que el flujo es incompresible, se obtiene.

$$(1.1.11) \quad \rho u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} [\nu \rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i u_j}].$$

El término $\overline{\rho u_i u_j}$ corresponde a los esfuerzos de Reynolds, que pueden interpretarse como la tasa de momento promedio transferido por las fluctuaciones turbulentas. Si el número de Reynolds es grande, los esfuerzos viscosos son pequeños y los esfuerzos de Reynolds dominan.

Aunque los flujos turbulentos han sido ampliamente estudiados y sus características conocidas son muchas tanto matemática como fenomenológicamente; la teoría de la turbulencia está limitada. Una aproximación a esta teoría se lleva a cabo postulando una relación entre la tensión y la tasa de deformaciones, para lo cual se define una viscosidad generada por la turbulencia misma. Esta viscosidad juega un rol análogo a la viscosidad molecular en flujos laminares. La aproximación anterior se basa en el parecido entre la forma en la que los movimientos moleculares transfieren momento y calor y la forma en la que las fluctuaciones turbulentas de la velocidad transfieren estas dos cantidades.

Desde que Prandtl y Taylor los propusieron se han desarrollado conceptos fenomenológicos muy útiles como la viscosidad debida a remolinos (*eddy viscosity*, en inglés) que es análoga a la viscosidad molecular, y la longitud de mezclado (*mixing length*), que tiene analogía con el camino de libre medio en la teoría cinética de los gases. Aunque estas consideraciones resultan muy funcionales, no debe olvidarse el hecho de que la viscosidad molecular es una propiedad de los fluidos, mientras que la viscosidad turbulenta es una característica de los flujos.

1.1.5. Flujo requerido en el túnel de viento.

Con los conceptos previamente presentados es posible hacer una descripción más específica de cómo se requiere el flujo en la zona de prueba. Será necesario que dicho flujo sea uniforme, laminar e irrotacional. Sin embargo los efectos viscosos pueden generar vórtices y provocar que el flujo sea rotacional o que su velocidad no sea uniforme en una zona lo suficientemente grande. Como se mencionó anteriormente es imposible que no haya capa límite pues forzosamente el aire dentro del túnel estará en contacto con sus paredes sólidas que lo frenarán en esa zona haciendo que los efectos viscosos sean considerables. Lo que se requiere entonces es que dicha capa límite sea lo suficientemente delgada para que sus efectos no afecten a la parte central de la zona de prueba, en la cual se podrán colocar objetos de tamaños suficientemente pequeños para que quepan en esta región sin efectos viscosos considerables. Esta idea se ilustra en la figura (1.1.3). Cabe mencionar que a un flujo cuyo perfil de velocidades es constante a lo largo de la longitud de un conducto, se le denomina flujo desarrollado. Además se considera que un flujo será desarrollado si éste fluye a través de un conducto cuya longitud sea de al menos 30 veces su diámetro.

Para lograr las condiciones del flujo mencionadas será necesario que las formas y tamaños de cada sección en el túnel de viento sean los adecuados para que los efectos viscosos propicien un flujo laminar y no creen una capa límite muy ancha. Además debe considerarse un factor extra: el mecanismo para provocar el flujo es un extractor y éste precisamente gira para sacar el aire del túnel y crear el flujo. Por ello se formará un flujo lleno de vórtices y por lo tanto turbulento y rotacional; lo cual debe evitarse en la zona de prueba. Es precisamente la sección que corresponde al difusor la encargada de minimizar estos efectos indeseados del extractor en la zona de prueba; por lo que su diseño debe hacerse cuidadosamente tomando en cuenta que tenga un tamaño suficientemente grande para cubrir las necesidades mencionadas.

Nótese que en el flujo tridimensional en la zona de prueba la velocidad puede variar con la posición. Para que el flujo en el túnel de viento sea adecuado para experimentos con fines de investigación, lo

que se requeriría idealmente es que la velocidad en la zona de prueba no dependa de las coordenadas. Aunque esto resulta no ser tan utópico para la coordenada a lo largo del túnel (llamémosla z), sí es imposible de lograr en su totalidad para las coordenadas correspondientes a la sección transversal del túnel, llamémoslas x y y ; debido a la existencia de la capa límite que frenará el flujo cercano a las superficies sólidas que serán las paredes del túnel.



FIGURA 1.1.3. Perfil de velocidades esperado en la zona de prueba. Se observa que la velocidad es uniforme en una sección central amplia.

Lo que se espera entonces es que exista, en el centro de la zona de prueba, una región suficientemente amplia en la que el flujo sea laminar, con $\nabla_x V$ muy pequeño y en la que $\frac{\sqrt{V^2}}{V} \sim 0.3 - 0.4$, para que las variaciones en la velocidad tampoco sean considerables; de manera que los cambios en las líneas de corriente se deban únicamente a la presencia del objeto que se coloque en la zona de prueba.

1.2. Pérdidas de energía en un túnel de viento subsónico

Anteriormente se ha establecido que la compresibilidad del aire puede ser ignorada en este túnel de viento; ya que el flujo a lo largo de él tiene velocidades suficientemente pequeñas para considerar que $M \leq 0.3$. También se ha visto que el flujo está sujeto a pérdidas de energía cinética que no deben despreciarse. Esta sección da cuenta de las

pérdidas energéticas en flujos subsónicos³, en los que se deben principalmente a dos factores: la resistencia debida a la fricción, y las pérdidas de presión debidas a vórtices.

Para trabajar con flujos en tuberías o en medios porosos se utiliza la llamada resistencia hidráulica. Aunque en este caso no se trata particularmente de tuberías (y menos aún de medios porosos), este parámetro también resulta ser de utilidad para cuantificar las pérdidas de energía a lo largo del túnel de viento [3]. La resistencia hidráulica se define como:

$$(1.2.1) \quad RH = \frac{\Delta p}{Q} \left[\frac{kg}{m^4s} \right],$$

donde Q es el volumen de fluido que pasa por unidad de área por unidad de tiempo. La definición anterior se hace análogamente a la resistencia eléctrica ($R = \frac{\Delta V}{I}$).

La resistencia hidráulica total de un túnel de viento define las pérdidas energéticas del flujo [3]. Esta resistencia se puede dividir en dos componentes:

1. La resistencia de fricción ΔRH_{fr} : se debe a la viscosidad del fluido y se manifiesta a lo largo de su movimiento como resultado del intercambio de momento entre las moléculas, si el flujo es laminar, y entre partículas individuales de capas adyacentes de fluido moviéndose a distintas velocidades, si el flujo es turbulento. La resistencia de fricción depende del número de Reynolds y del grado de rugosidad de las paredes, que se denota como ϵ .
2. La resistencia local ΔRH_{loc} : aparece cuando hay una perturbación del flujo medio, debido a una separación local de la capa límite o por el mezclado turbulento. También las pérdidas de presión dinámica que ocurren por una expansión en el ducto, pueden considerarse como pérdidas locales de energía. Estos factores dependen de la geometría de los elementos del túnel.

³Se especifica que son subsónicos porque de lo contrario deben tomarse en cuenta pérdidas energéticas adicionales debidas a la compresibilidad del aire.

La resistencia hidráulica de un ducto muchas veces se expresa en términos de la velocidad:

$$(1.2.2) \quad \Delta RH_{tot} = \zeta_{tot} \frac{v^2}{2},$$

donde $\zeta_{tot} = \zeta_{fr} + \zeta_{loc}$ es el coeficiente de resistencia hidráulica total y ζ_{loc} y ζ_{fr} son los coeficientes de resistencia hidráulica local y de fricción respectivamente y v es la velocidad promedio en la sección considerada. Por tanto, para iniciar el diseño de las secciones de un túnel de viento, es recomendable determinar las magnitudes aproximadas de ζ_{fr} y ζ_{loc} ; así como saber de qué factores dependen dichos coeficientes. Para facilitar los cálculos de las pérdidas de energía en cada zona del túnel, los valores de ambos coeficientes de resistencia hidráulica se expresan en términos de la velocidad en la zona de prueba. Para ello se multiplican por el valor $(\frac{A_{zp}}{A})^2$ donde A es el área transversal del elemento del túnel en cuestión y A_{zp} es el área transversal de la zona de prueba. Las magnitudes ζ_{loc} y ζ_{fr} se estiman de la información obtenida midiendo las resistencias local y de fricción de varias secciones de túneles de distintas formas. Dicha información puede deducirse de las distintas consideraciones encontradas en el handbook [5].

El coeficiente de resistencia hidráulica de fricción puede escribirse de la forma.

$$(1.2.3) \quad \zeta_{fr} = \lambda \frac{l}{Dh},$$

donde λ es a su vez un coeficiente de fricción del elemento considerado, que es función de la rugosidad, de la forma tanto del elemento del túnel como de su sección transversal y del número de Reynolds. Los distintos valores de λ dependiendo de estos parámetros son del orden de ~ 0.07 y se pueden encontrar en [5]. l es el largo de la sección del túnel de viento en cuestión y Dh es el diámetro hidráulico que también puede expresarse en términos de la sección transversal A y de su perímetro Π como $Dh = \frac{4A}{\Pi}$.

Por otro lado el coeficiente de resistencia hidráulica local ζ_{loc} depende de los parámetros geométricos y de tres factores generales de movimiento: el número de Reynolds, el número de Mach y el perfil de

velocidades en un elemento del túnel. Este último factor es función del régimen del flujo y de las formas tanto del elemento como de su entrada. El coeficiente de resistencia hidráulica local se define como la relación entre la pérdida total de presión ΔH_l y la carga de velocidad⁴ $\frac{V^2}{2g}$ en la sección. Por lo tanto para determinarla, se hace pasar un fluido (no necesariamente aire) por el elemento del túnel considerado. Se mide la presión tanto en la entrada como en la salida de dicho elemento y la velocidad en cierta zona del mismo, que generalmente es la entrada. Así, es posible calcular ζ_l de la siguiente manera:

$$(1.2.4) \quad \zeta_l = \frac{\Delta H}{V_p^2/2g},$$

donde V_p es la velocidad promedio del flujo y g es la aceleración gravitacional.

Cabe mencionar que al considerar las pérdidas a lo largo del túnel de viento es válido el principio de superposición de pérdidas, tanto en cada sección por separado del túnel como a lo largo de todo éste. Lo anterior significa que las pérdidas encontradas para elementos separados del sistema se suman aritméticamente para obtener la resistencia hidráulica total de todo el túnel de viento.

1.3. Principios de medición en un túnel de viento

Como el propósito de un túnel de viento es estudiar un flujo tanto visualizándolo como realizando mediciones de su velocidad; se dedica esta sección al estudio de las técnicas necesarias para llevar a cabo el estudio requerido del flujo. Debe tomarse en cuenta que no hay una forma óptima de visualizar y hacer mediciones precisas dentro del túnel de viento. Según el tipo de flujo a estudiar, las condiciones que se tengan y los resultados que se quieran obtener, resulta más conveniente utilizar una u otra técnica.

⁴En hidráulica, la carga es un concepto que relaciona la energía de un fluido incompresible con la altura equivalente de una columna estática de dicho fluido; esto utilizando precisamente la ecuación de Bernoulli (1.1.6). La carga de velocidad es la altura que se asocia a la energía cinética debida al volumen del fluido en movimiento.

Aunque las técnicas utilizadas para caracterizar un flujo son muchas y muy variadas, en esta sección sólo se mencionarán las que principalmente pueden utilizarse en un túnel de viento como el respectivo a este trabajo. Cabe destacar que la primera técnica mencionada, anemometría de hilo caliente, es de medición, la técnica de P.I.V. hace posible visualizar los campos de velocidad y hacer mediciones de los mismos, mientras que las visualizaciones con humo se utilizan para visualizar las líneas de flujo directamente en la zona de prueba.

Anemometría de hilo caliente.

Un anemómetro de hilo caliente consiste en un alambre muy delgado (del orden de micrómetros) que es calentado eléctricamente a una temperatura mayor que la ambiente. Los materiales de los que comúnmente se construyen estos filamentos son tungsteno, platino e iridio; ya que son capaces de fabricarse con diámetros pequeños, tienen baja conductividad eléctrica y su resistencia eléctrica depende de la temperatura.

El principio de funcionamiento de estos dispositivos consiste en que, al pasar un flujo por el filamento, lo enfría haciendo que la resistencia también disminuya. El filamento va conectado a un circuito eléctrico cuyo voltaje aumenta. Al cambiar la velocidad del flujo, el voltaje también varía. Puede calibrarse el dispositivo al establecer las relaciones adecuadas entre voltaje y velocidad. Para ello se utiliza el conocido hecho de que los vórtices del camino de Von Karman generado por un flujo al atravesar un cilindro, tienen una frecuencia que se relaciona de manera relativamente simple con el número de Reynolds y por lo tanto con la velocidad del flujo; esta relación es la siguiente.

$$(1.3.1) \quad f = (0.212Re - 4.5) \frac{\nu}{d^2},$$

donde f es la frecuencia, ν la viscosidad y d el diámetro del cilindro. Sin embargo en mediciones posteriores no siempre se debe colocar un cilindro para encontrar la frecuencia de los vórtices de Von Karman y así la velocidad, por lo que se utiliza el hecho de que existe una relación lineal entre el voltaje al cuadrado y la raíz cuadrada de la velocidad.

Se hace un ajuste lineal y se determina a qué velocidad corresponde cada frecuencia y por lo tanto cada voltaje reportado por el programa correspondiente al anemómetro de hilo caliente en cuestión.

Una ventaja de esta técnica es el hecho de que no sólo da una aproximación de la velocidad, sino que detecta las fluctuaciones de la misma; gracias a lo cual es posible cuantificar tanto la turbulencia como la vorticidad.

Velocimetría por imágenes de partículas (P.I.V).

La velocimetría por imágenes de partículas o P.I.V. por sus siglas en inglés (*Particle Image Velocimetry*) es una técnica óptica utilizada para obtener mediciones de las velocidades instantáneas en un flujo. Esto resulta en los campos de velocidad y de vorticidad del mismo. Para que el P.I.V. funcione, el flujo debe tener lo que se conoce como un sembrado de partículas, las cuales deben ser lo suficientemente pequeñas y ligeras para seguir la dinámica del flujo.

El fluido susceptible de estudiarse con P.I.V. es iluminado con una hoja de luz generada usualmente por un láser; una cámara (generalmente una CCD o CMOS) capta imágenes sucesivas del flujo. En cada una de estas fotografías se visualizan puntos que corresponden a las partículas de sembrado. Posteriormente un programa correlaciona las imágenes, tomando en cuenta cómo ocurre la variación de las posiciones sucesivas de cada partícula y de esta forma calcula el vector desplazamiento para los distintos puntos. De este modo es posible obtener los campos de velocidad y vorticidad de un flujo. Cabe mencionar que el proceso de correlación no es sencillo, pues corresponde a un tratamiento estadístico mediante el cual se encuentran los desplazamientos de las partículas en el flujo, haciendo funciones de correlación que relacionen las posiciones sucesivas de dichas partículas.

Visualizaciones con humo.

Debido a la transparencia del aire, que es el que fluirá a lo largo del túnel, es necesario introducir partículas que no sean transparentes para así poder visualizarlo en movimiento. Lo que se hace comunmente

es inyectar humo e iluminarlo apropiadamente para que logren observarse las líneas de flujo. Algunas de las técnicas más utilizadas para producir humo son: quemar tabaco o madera, vaporizar aceites minerales, provocar reacciones químicas que liberen vapores al ambiente y rociar aerosoles. También son útiles las llamadas máquinas de humo, las cuales lo producen vaporizando una mezcla generalmente de agua con glicerina.

En cuanto a la iluminación para observar satisfactoriamente las líneas de flujo “coloreadas” gracias al humo, lo que se hace generalmente es producir, utilizando una lente cilíndrica, una hoja de luz en la sección de flujo que interese visualizar. Esta hoja de luz se genera con una fuente luminosa suficientemente potente como puede ser un láser.

Vale la pena mencionar que el humo no necesariamente debe inyectarse en todo el aire que entre al túnel de viento, basta con inyectar humo en las líneas de flujo que pasan por donde se produce la hoja de luz. Esta situación debe tomarse en cuenta en el diseño del túnel de viento.

Capítulo 2

Diseño de un túnel de viento

2.1. Diseño de la zona de prueba

Como se mencionó en el capítulo anterior la zona de prueba es la sección principal del túnel de viento. En ella el flujo debe ser laminar y de hecho es sobretodo para ello la manera particular en la que se construyan las demás partes.

El diseño de esta sección del túnel, no es tan complicado como el de las demás partes (esto quedará claro al final del presente capítulo); sin embargo conlleva a consideraciones de tamaño, forma, materiales y velocidades requeridas.

En cuanto a las dimensiones de la zona de prueba y de acuerdo a lo establecido en la subsección 1.1.5; se sabe que éstas limitan el tamaño de los objetos a estudiar, pues dichos objetos deben ser lo suficientemente pequeños para que quepan en la región donde la velocidad es uniforme. Lo anterior nos llevaría a pensar que la zona de prueba debe ser muy grande. Sin embargo hay dos factores importantes que limitan su tamaño. Las demás secciones del túnel de viento tienen dimensiones mayores que las de la zona de prueba; por lo que agrandarla mucho implicaría tener un cono de contracción y un difusor enormes; lo cual provocaría, por un lado que se vuelva difícil encontrar espacio suficiente para este túnel dentro de la Facultad de Ciencias y por otro lado que aumente notablemente el costo de los materiales. Se vuelve entonces necesario considerar objetos no tan grandes para colocarse dentro del túnel de viento, y aunque esto limite su tamaño, no resulta ser un problema grave al poderse resolver encontrando objetos a escala.

Aunque la forma más usual de la zona de prueba es la de un prisma rectangular, no es la única que se ha considerado en el diseño de túneles de viento a lo largo de la historia. Se sabe [4] que hubo ingenieros

que probaron construir zonas de prueba con distintas formas: circular, elíptica, cuadrada, rectangular y octagonal. Sin embargo el uso de las mismas reveló que las zonas de prueba con formas redondeadas no son prácticas de manejar, pues dificultan la manera de colocar objetos dentro de ellas. Además no se encontraron diferencias considerables en cuanto a la fricción obtenida en las zonas de prueba con diferentes formas. Esto llevó a que la manera más usada de zonas de prueba sea la de un prisma rectangular.

La longitud de la zona de prueba varía en la práctica, siendo de una a dos veces la longitud de un lado de su sección transversal. Mientras el aire recorre la zona de prueba, la capa límite se va engrosando, lo cual reduce el área efectiva del flujo y causa un incremento en su velocidad. Este incremento a su vez produce que la presión local estática decrezca, produciendo un arrastre añadido al cual se le conoce como resistencia horizontal.

En cuanto a los materiales usados para construir la zona de prueba, debe tomarse en cuenta que el factor más importante es que sea posible observar el flujo alrededor de los objetos que se coloquen en esta sección. Dependiendo también de los propósitos del túnel de viento y de los diferentes ángulos desde los cuales se quieran estudiar a los objetos introducidos en él, se determina si se quiere tener todas las paredes y los techos transparentes, o sólo algunos de ellos. Es deseable también que el material o materiales de los cuales se construya esta sección sean resistentes y duraderos. Estos factores llevan a considerar el uso de acrílico como primera opción en la construcción de la zona de prueba.

Además es recomendable tomar en cuenta cómo se podrán introducir los objetos en la zona de prueba, el mecanismo mediante el cual una (o más) de sus paredes podrá abrirse y cerrarse, y el hecho de qué tan herméticamente podrá cerrarse; ya que no se quiere que haya flujos ni saliendo ni entrando transversalmente a las paredes de la zona de prueba. También debe pensarse en cuál será la forma de caracterizar el flujo obtenido. Si se utiliza la técnica mencionada en la subsección 1.3, es decir, un anemómetro de hilo caliente; debe tomarse en cuenta que este aparato contiene una punta muy sensible y no se puede colocar

sin tener un porta-sondas, por lo que debe considerarse que sea factible colocar este dispositivo en alguna pared de la zona de prueba.

Sería deseable construir la zona de prueba de tal forma que a lo largo de ella, la presión estática tuviera un valor constante. Sin embargo no hay un método de diseño exacto que asegure esta aspiración. Hay estudios [4] que consideran recomendable hacer diverger las paredes de la zona de prueba para disminuir este gradiente de presión, pero dicha divergencia debe ser muy pequeña, del orden de $1/2$ grado. Si se toma en cuenta que el largo de la zona de prueba será de 70cm , puede calcularse que las paredes de la zona de prueba deberían diverger $0.61\text{cm} = 70\text{cm} \sin(0.5^\circ)$ de cada lado y de extremo a extremo. Aunque en la mayoría de los casos se utilizan zonas de prueba con sección transversal constante, puede verse que 0.61cm de cada lado no resultan del todo despreciables. Además hacer diverger las paredes de la zona de prueba en favor de la disminución del gradiente de presión no complica demasiado la construcción de la misma, por lo que en el presente trabajo se toma en cuenta lo reportado en [4] y se construye el túnel siguiendo esta recomendación.

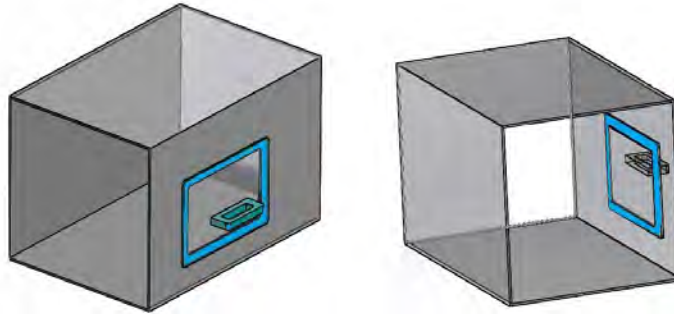


FIGURA 2.1.1. Zona de prueba diseñado en *SolidWorks*. En esta imagen se observa la forma en la que se construye la tapa para introducir objetos a la zona de prueba.

Tomando en cuenta todas las consideraciones anteriores, se decidió diseñar la zona de prueba en forma de un prisma casi rectangular de acrílico. El área transversal del mismo es cuadrada, de lado de 45cm

en la entrada pero 1.22cm mayor en la salida, para que de esta forma se realice con la divergencia recomendada. El largo de esta zona, es de 70cm , cumpliendo así con las recomendaciones hechas por [4] de que sea de una a dos veces el lado de su área transversal. Para que sea resistente el acrílico utilizado es de 0.6mm de ancho, lo cual es suficiente para no quebrarse al ser manejado ni al realizar las instalaciones pertinentes para colocar el portasondas. La “puerta” de esta zona se construirá con un acrílico un poco más ancho, de 12mm ., para que embone y salga de la pared de la zona de prueba de la forma requerida, la cual se muestra en la figura 2.1.1.

De esta forma a través de la puerta será posible sacar y meter a la zona de prueba los objetos a estudiar; además el diseño de la misma evita que haya bordes que perturben al flujo.

2.2. Diseño de la cámara de asentamiento

La cámara de asentamiento es la entrada misma del túnel. Consiste en una sección de área transversal constante y cuyo propósito es el de suavizar al flujo antes de que entre al cono de contracción. Esta sección debe constar de una estructura resistente para que sea capaz de soportar firmemente a los dispositivos adecuados para incrementar la uniformidad del flujo y reducir la intensidad de la turbulencia. Estos dispositivos son principalmente dos: un retículo compuesto de celdas que laminarizan al flujo y un conjunto de mallas con el mismo propósito. A continuación se expondrán más específicamente las características de cada dispositivo.

2.2.1. Celdas para laminarizar el flujo o *honeycomb*:

Este retículo consiste en celdas cuya longitud es al menos 5 veces mayor a su diámetro. Se han utilizado celdas con distintas formas en su sección transversal. Unas muy usadas son las hexagonales, pues se empalman unas con otras sin dejar huecos. Estas celdas hexagonales se asemejan a la vista a un panal de abejas, es en gran parte por ello que en inglés este retículo es conocido como *honeycomb*. Sin embargo, no se le da un nombre distinto si las áreas transversales tienen otra forma

diferente a la hexagonal. También es común utilizar celdas de secciones transversales cuadradas o circulares; aunque estas últimas dejan huecos al colocar unas a lado de otras.

El retículo conocido como *honeycomb* es capaz de reducir las fluctuaciones del flujo en la componente transversal de la velocidad y la vorticidad. Puesto que la disminución en la presión dinámica a través del *honeycomb* es pequeña, tiene poco efecto sobre la velocidad longitudinal [8]. La razón principal para usar el *honeycomb* es que, con una longitud suficiente (de al menos 10 veces el diámetro), es un dispositivo muy efectivo para dar uniformidad al flujo y rectificarlo. Es común en los diseños de túneles de viento, utilizar el parámetro llamado porosidad para caracterizar tanto al *honeycomb* como a las mallas de las que se hablará en la siguiente subsección.

$$(2.2.1) \quad \text{Porosidad} = \beta = \frac{A_{\text{flujo}}}{A_{\text{total}}},$$

donde A_{flujo} es el área efectiva por la cual fluye el aire, es decir el área considerando que quitamos la correspondiente al ancho del material de las celdas para laminarizar el flujo. Y A_{total} es el área total de la cámara de asentamiento sin tomar en cuenta la que se quita por las celdas.

Es recomendable [8] que la porosidad del *honeycomb* sea $\beta \geq 0.8$, ya que de no ser así las pérdidas de velocidad debidas a este retículo son excesivamente grandes. Además hay otro criterio que se recomienda [8] tomar en cuenta para el diseño del *honeycomb*: que la relación entre la longitud de las celdas L y el diámetro de las mismas D cumpla.

$$(2.2.2) \quad 6 \leq \frac{L}{D} \leq 8.$$

Aunque esta recomendación se hace con el mismo propósito de asegurar que las pérdidas debidas a la fricción con el *honeycomb* no sean demasiado grandes, hay un factor extra que da pie a que no necesariamente se siga la relación dada por 2.2.2. Como se vio en la subsección 1.1.4, cuando un fluido atraviesa un conducto cuya longitud sea de al menos 30 veces su diámetro, el flujo será desarrollado. Esto puede

ocurrir si las celdas del *honeycomb* son lo suficientemente largas. Por lo tanto, y a pesar de las pérdidas energéticas, se ha decidido que el diseño de las celdas del *honeycomb* se realice con $\frac{L}{D} \sim 30$. Las dimensiones específicas de estas celdas y su material, se mencionarán en el capítulo 3.

2.2.2. Mallas en la cámara de asentamiento:

Se ha visto [8] que las mallas colocadas en la cámara de asentamiento reducen la velocidad en la dirección misma del flujo. Además ha sido demostrado que es más eficiente utilizar mallas de distintos diámetros unas seguidas de otras, que colocarlas todas del mismo diámetro. Para que sean más efectivas reduciendo la turbulencia, las mallas deben tener una porosidad de $0.58 \leq \beta \leq 0.8$ [9]. Cuando la porosidad de la malla es $\beta \geq 0.8$ no hay un buen control de la turbulencia y cuando $\beta \leq 0.58$ se propicia la inestabilidad del flujo.

Como ya se ha mencionado el *honeycomb* tiene un efecto limitado sobre las variaciones longitudinales de la velocidad, además tampoco es efectivo disminuyendo inestabilidades cuyo tamaño sea menor que el diámetro de las celdas. De hecho el *honeycomb* crea su propia turbulencia de escala característica, la cual toma una distancia considerable en decaer [7]. Por lo tanto es recomendable que después del *honeycomb* se coloquen dos mallas anti-turbulencia. La primera de ellas se recomienda que sea de alambre o de alguna tela tipo “mosquitero” y que se coloque inmediatamente después de las celdas del *honeycomb*. La segunda puede ser de nylon y se coloca a 8.0cm de la primera, permitiendo que haya distancia suficiente para que la turbulencia creada por la primera malla decaiga antes de que el aire llegue a la segunda malla [7]. La segunda malla se coloca 4.0cm antes de que empiece la contracción, de forma que al entrar a la misma, la turbulencia debida a la segunda malla habrá disminuido.

Se espera que a lo largo del cono de contracción las dos mallas reduzcan la intensidad de la turbulencia a menos del 1 %. Si se asume que el aire circundante al túnel de viento tiene una intensidad de turbulencia de 30–70 %, la intensidad de la turbulencia en la zona de prueba en

condiciones ideales del túnel debería de ser de entre 0.2 y 0.6 %. Lo cual es bastante aceptable en túneles de viento de universidades alrededor del mundo [7].

2.2.3. Cámara de humo.

Aunque la cámara de humo no es estrictamente parte de la cámara de asentamiento, sí es recomendable colocarla dentro de ella, por lo que se incluye en la presente sección. La cámara de humo simplemente consiste en un “recipiente” en el cual se produce el humo requerido para visualizar el flujo, y se conduce a ciertas secciones del *honeycomb* para que las líneas de flujo que contengan humo sean precisamente las que se requiere visualizar.

En la práctica lo anterior significará que haya dos hileras de celdas en el *honeycomb* que sean más largas que las demás para así conducir las a la cámara de humo; una de estas hileras será horizontal y la otra vertical para que de esta forma sea posible visualizar el flujo contaminado por el humo tanto en un plano paralelo al piso como en uno perpendicular a él, según se requiera de acuerdo al experimento realizado. Tomando en cuenta lo estudiado en la sección 1.1.2, se sabe que la zona en la que el flujo será más uniforme y por lo tanto en la que es más conveniente observar al flujo alrededor del objeto de estudio, es en el centro de la zona de prueba, lejos de las paredes. Por ello, el mejor lugar para colocar las hileras que lleven humo, es precisamente el centro; por lo que ambas hileras se colocan formando una cruz que se intersecta en el centro de la cámara de asentamiento.

2.3. Diseño del cono de contracción

Son muchos los motivos por los cuales es imprescindible que haya una contracción que guíe al flujo de la cámara de asentamiento a la zona de prueba. Sin embargo se ha visto [10, 11, 12, 13] que, en beneficio de la uniformidad del flujo, es recomendable construir este cono de contracción de manera que no sea recto, sino en una forma parecida a una “S”, cuyas características particulares se describirán en detalle más adelante. Además el hecho de que la forma del cono de contracción

sea redondeada, hace posible que las condiciones deseables en el flujo se alcancen utilizando una longitud menor que la que se requeriría si el cono fuese recto. Las razones por las cuales se utiliza el cono de contracción son bien conocidas y mencionadas por muchos autores; a continuación especifican las más importantes:

- La aceleración del flujo lograda por el cono de contracción sirve para producir un perfil de velocidades más uniforme en la zona de prueba [10].
- Reduce el nivel relativo de turbulencia [7 y 10].
- Reduce las pérdidas de velocidad causadas por el *honeycomb* [10].
- El cono de contracción aumenta la eficiencia al darle al extractor una mayor distancia para “jalar” el aire [14].
- Si se construye el cono de contracción de manera óptima, provee prácticamente un incremento continuo en la velocidad de la cámara de asentamiento a la zona de prueba [4].

Sin embargo, el cono de contracción tiene también algunos inconvenientes que igualmente han sido analizados por los autores que mencionan sus ventajas. Por un lado, aunque la campana sea suave, es muy difícil que la velocidad se incremente monótonamente. De hecho según [10] tiene un mínimo cerca de la entrada y un máximo cerca de la salida. Al entrar a la contracción el flujo en promedio empieza a acelerarse, pero localmente los efectos de curvatura dominan, por lo que hay gradientes de presión transversales. Como resultado el perfil de velocidades a la salida nunca es completamente uniforme. Además si el cono de contracción es muy corto, las inuniformidades de velocidad pueden alcanzar el 10% y esto es inaceptable para realizar experimentos serios dentro del túnel de viento.

Otro problema importante es que la capa límite se puede desprender o agrandar, y aunque esto es más difícil de presentarse en una campana redondeada, se debe tener cuidado al seleccionar la forma de la misma; ya que el desprendimiento de la capa límite propicia inestabilidades en el flujo y debe ser evitado a toda costa. El desprendimiento de la capa

límite se debe a los gradientes de presión adversos en las paredes de ambos extremos del cono de contracción. Estos gradientes de presión aumentan al disminuir la longitud de la contracción. La presión estática cerca de las paredes es mayor a la del centro del cono, y por lo tanto mayor que la presión promedio sobre la sección transversal. Por fortuna para propiciar la uniformidad del flujo en la zona de prueba, en general es más difícil que la capa límite se desprenda en la contracción de la salida de la campana, que es regularmente convexa, que en la de la entrada de la campana, que es cóncava. Esto se debe a que, en la salida del cono de contracción, el flujo ha pasado por un gradiente de presión positivo.

También hay que tomar en cuenta que una campana muy larga permitiría que la misma capa límite se esanchara demasiado, provocando que el área efectiva en la zona de prueba disminuyera notablemente. Además, un cono de contracción muy grande incrementaría el costo y el tamaño del túnel de viento, y aunque estos factores físicamente son irrelevantes, sí deben ser tomados en cuenta, sobretodo para que haya un espacio en la Facultad de Ciencias capaz de albergar al túnel.

Por tanto se debe considerar un cierto rango de longitudes intermedias para las cuales no haya desprendimiento ni demasiado ensanchamiento de la capa límite (siendo deseable también que no se dificulte el manejo del túnel de viento). En [10] se considera que, si L es el largo de la campana y R_1 es su radio en la entrada (que es la zona más amplia), los valores recomendables para la relación de L con el diámetro, es decir para $\frac{L}{2R_1}$ son:

$$(2.3.1) \quad 0.75 \leq \frac{L}{2R_1} \leq 1.25,$$

por lo que algo intermedio como $\frac{L}{2R_1} \sim 1$ debería ser una buena opción. Para hacer el cono de contracción se construye primero cada una de sus cuatro paredes que inicialmente son planas y al juntarse adquieren una curva, contrayéndose un poco. Por ello se empieza con una relación de $\frac{L}{2R_1} = 1.20$, mayor a la media, al cortar cada una de

las paredes planas; para que así al curvarse y disminuir la longitud L del cono completo, la relación $\frac{L}{2R_1}$ sea cercana a la unidad.

Otro parámetro importante a determinar en el diseño del cono de contracción, es su radio de contracción CR , el cual está dado por:

$$(2.3.2) \quad CR = \frac{A_{C.A.}}{A_{Z.P.}},$$

donde $A_{C.A.}$ es el área transversal de la cámara de asentamiento y $A_{Z.P.}$ es el área transversal de la zona de prueba. Como ya se ha determinado que el lado de la zona de prueba mide $0.45m$ entonces su área transversal es de $A_{Z.P.} = 0.2025m^2$. En cuanto al área transversal de la cámara de asentamiento, es deseable definirla de acuerdo al radio de contracción que se quiera. La determinación de CR se basa en las recomendaciones hechas por los autores citados anteriormente en esta sección [7,8, 10].

Según [10] pueden considerarse radios de contracción que vayan desde 2 hasta 25. Sin embargo para CR considerados pequeños, que son los menores a 4, es más fácil que haya separación de la capa límite. Por otro lado en [7] se considera que los radios de contracción más eficientes para $6 \leq CR \leq 9$. Este mismo autor menciona que el radio de contracción recomendado se construye para disminuir el nivel de la turbulencia, por lo que también puede compensarse reduciendo el nivel de la turbulencia de otras maneras. Coggan construye un cono de contracción con $CR = 4$ y afirma que se puede compensar el hecho de que sea menor al óptimo colocando lo que él llama “pantallas anti-turbulencia” que son mallas como las dos que se colocan antes de la contracción como se vio en la subsección 2.2.2.

Como se ha visto, el CR considerado como óptimo está alrededor de 7. Esto, con las dimensiones propuestas para la zona de prueba, nos llevaría a que la cámara de asentamiento tuviera un área transversal de $1.41m^2$. Sin embargo este valor es demasiado grande para los propósitos del túnel requerido; ya que se incrementaría el peso de la cámara de asentamiento de tal manera que ni siquiera podría ser cargada por menos de tres personas, lo cual resulta incómodo e inconveniente. Por

ello se decidió que a lo más la cámara de asentamiento debía tener un área transversal de $1m^2$, resultando entonces que $CR = 4.94$. De esta forma sí resulta ser medianamente manejable por alumnos y profesores de la Facultad de Ciencias. Además es cierto que, como se menciona en [7], la reducción en el nivel de la turbulencia lograda con un CR mayor, puede compensarse con las mallas previas a la contracción.

Hasta ahora se ha visto cuáles serían las magnitudes óptimas en el diseño del cono de contracción, pero no se ha hablado de su forma específica. Se sabe que es mejor que sea redondeada. Hay un sinfín de curvas susceptibles a usarse para construir esta campana. El criterio principal a tomar en cuenta para la forma de la misma, es que favorezca que la velocidad del flujo a la salida sea uniforme. Para propiciar esta condición se se han llevado a cabo algunos trabajos teóricos. Uno de ellos [11] procura predecir un contorno al cual sea posible ajustar las líneas de corriente del flujo, determinando que la forma óptima para la campana es la de dos curvas cúbicas unidas suavemente en el punto de inflexión. Similarmente en [12] se pretende calcular el polinomio óptimo para usarse como contorno de la campana, haciendo tanto un trabajo experimental como una simulación en Fortran, da una posible ecuación con coeficientes a ajustar para esta curva:

$$(2.3.3) \quad R(x) = \begin{cases} R_1 - A_1x^n & x \leq x_1 \\ R_0 + A_2(L - x)^n & x \geq x_1 \end{cases}.$$

Para escribir las ecuaciones 2.3.3 se ha tomado en cuenta que el origen está en el centro de la entrada del cono de contracción, $R(x)$ es el radio de la misma en función de la coordenada x cuando ésta va a lo largo de la campana incrementándose conforme se acerca a la zona de prueba. Debe notarse que, como el cono de contracción considerado es simétrico, las ecuaciones 2.3.3 únicamente se dan para el lado superior (o inferior) de una de las caras de la campana en un plano. R_1 es de nuevo el radio mayor del cono de contracción, el cual se encuentra a su entrada. R_0 es el radio menor del cono, encontrándose a la salida del mismo y coincidiendo con la zona de prueba; x_1 es el punto de inflexión

en el cual se espera que las curvas se unan suavemente. L de nuevo es el largo del cono de contracción y los coeficientes A_1 y A_2 son ajustables para que ambas curvas se unan suavemente en el punto x_1 . De hecho para calcular A_1 y A_2 se imponen las dos condiciones necesarias en la campana:

1. Que ambas curvas efectivamente se unan en x_1 , es decir: $R_1 - A_1x_1^n = R_0 + A_2(L - x_1)^n$, lo cual implica que

$$(2.3.4) \quad A_2 = \frac{R_1 - R_0 - A_1x_1^n}{(L - x_1)^n}.$$

2. Que se unan suavemente en x_1 , lo cual conlleva a que sus derivadas coincidan en x_1 , es decir: $-nA_1x_1^{n-1} = -nA_2(L - x_1)^{n-1}$, esto implica que

$$(2.3.5) \quad A_1 = \frac{R_1 - R_0}{Lx_1^{n-1}}.$$

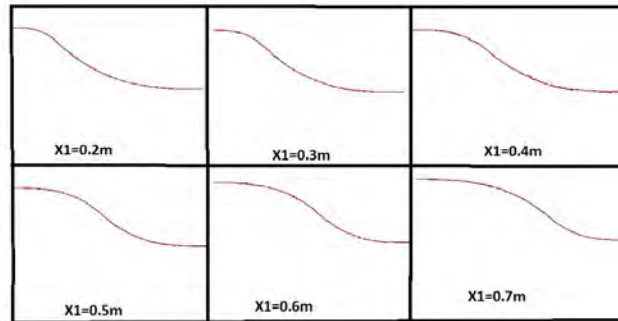


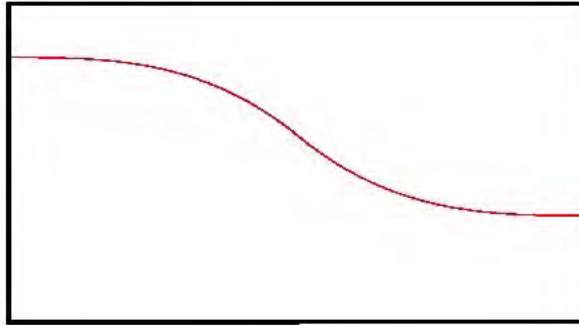
FIGURA 2.3.1. Formas del cono de contracción conforme varía el punto de inflexión x_1 graficadas con el programa gnuplot.

Con las A_1 y A_2 calculadas y tomando en cuenta las dimensiones determinadas para el túnel de viento ($R_1 = 0.5m$, $R_0 = 0.225m$, $L = 1.1m$), se obtiene una ecuación más precisa para la forma de la curva con la que se construye la campana; en la cual, los únicos parámetros cuyo valor falta decidir son el punto de inflexión x_1 y el exponente n . En el mismo trabajo [12] se concluye que el exponente más recomendable

es $n = 3$, por lo que será este el que se use. Para escoger el punto de inflexión, se observaron las distintas formas de conos de contracción (variando dicho punto) y se determinó cuál de ellas permitiría al flujo recorrer la campana sin cambiar de concavidad de manera abrupta. En la figura 2.3.1 se observan las formas de la campana conforme varía x_1 . Observando dicha figura, puede notarse que las formas más suaves son en las que el punto de inflexión es cercano a la mitad de L . Esto coincide con lo reportado por [12] en donde se afirma que es recomendable que el punto de inflexión sea cercano a $0.5L$. Por ello se ha elegido que $x_1 = 0.55 = 0.5L$.

Como se mencionó antes, en [12] (en el cual también se plantean las ecuaciones 2.3.3) se recomienda usar un exponente cúbico $n = 3$. Además [10] señala que, aunque no hay una forma óptima para la pared del cono de contracción, el hecho de utilizar una cúbica definitivamente es una buena elección. Precisa que es una buena elección que la forma de la pared de la campana conste de dos cúbicas unidas suavemente en el punto de inflexión, siendo este punto un parámetro ajustable. El trabajo realizado en [10] es el que más ahonda en el tema del cono de contracción y hace un estudio más serio al respecto; de hecho otros autores se basan en él para sus estudios. Con base en estos principios se decidió efectivamente utilizar las ecuaciones 2.3.3, con las A_1 y A_2 encontradas y con $n = 3$. Con lo anterior y sustituyendo los valores para el túnel del presente trabajo estas ecuaciones quedan:

$$(2.3.6) \quad R(x) = \begin{cases} 0.5m - 0.8264x^3m & x \leq 0.55 \\ 0.225m + 0.8264(1.1 - x)^3m & x \geq 0.55 \end{cases}.$$



Curva elegida para el cono de contracción. Después del estudio hecho en la presente sección se determinó que esta curva sería la que mejor se adapta a las necesidades tanto prácticas como en términos de un mejor flujo en la zona de prueba.

Con esta ecuación se graficó la curva óptima para el cono de contracción, la cual se muestra en la figura 2.3.

2.4. Diseño del difusor

El difusor es un ducto que se ensancha gradualmente y se coloca después de la zona de prueba y antes del extractor. En él la velocidad de las partículas de fluido disminuye poco a poco, haciendo que en el final de la zona de prueba no haya cambios abruptos de velocidad, y favoreciendo así a la uniformidad del flujo en ella. Debido a esto, el difusor es una sección de gran importancia en el túnel de viento.

Los parámetros que caracterizan a un difusor son su longitud, su ángulo de divergencia, su forma y su radio de expansión; todos ellos se deben ajustar para construir el difusor óptimo. Sin embargo hace falta hablar primero de lo que se espera conseguir con esta sección del túnel de viento.

En primer lugar, tal y como lo han señalado varios autores [3, 7, 16, 17], debe tomarse en cuenta que la función principal de un difusor es la de disminuir la velocidad del flujo (y por lo tanto su energía cinética), aumentando la presión estática en él. Se ha visto que esta transformación de presión dinámica en presión estática favorece a incrementar la eficiencia en el túnel de viento [6].

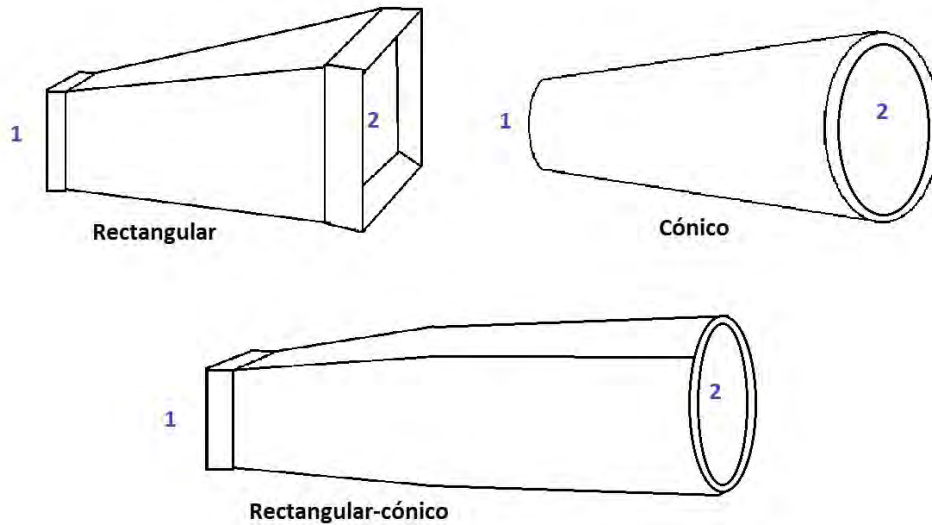


FIGURA 2.4.1. Diferentes geometrías que suelen utilizarse para construir difusores.

En la literatura se pueden encontrar distintas geometrías usadas para construir difusores, sin embargo en la mayoría de los casos, no se especifica demasiado cuáles son las ventajas y desventajas de las mismas. La geometría más común utilizada para túneles de viento no muy especializados es la más sencilla de todas: la rectangular. En ella el difusor cuenta con 4 paredes rectas que se ensanchan poco a poco pero sin curvarse. En este caso la sección transversal es cuadrada. La segunda geometría utilizada para construir difusores es la cónica, la cual consta de paredes circulares que se ensanchan en esta misma forma. La tercera geometría considerada es una combinación de las dos anteriores, inicia cuadrada o rectangular y termina en forma de un anillo en el cual se coloca el extractor. Los tres tipos de geometrías utilizados en túneles de viento se observan en la figura 2.4.1.

En la única referencia en donde sí se encontró un análisis cuantitativo para comparar las distintas geometrías de los difusores fue en la tesis citada en [16]. En ella se reporta una simulación hecha en el programa *SolidWorks* del flujo a través de un túnel de viento y se estudia

cómo cambian parámetros importantes como la reducción de pérdidas y la eficiencia según se realice el difusor del túnel. Se detallarán los resultados obtenidos en este trabajo; sin embargo antes se plantearán algunos principios para así poder estudiar cuantitativamente el diseño del difusor.

Dado que el difusor es una expansión, la velocidad disminuirá al fluir el aire a través de él. Si se considera la entrada del difusor como el punto 1 y la salida como el punto 2 (tal y como se muestra en la figura 2.4.1), aplicando la ecuación de continuidad para un flujo incompresible 1.1.2 y en una dimensión; es posible escribir:

$$(2.4.1) \quad A_1 V_1 = A_2 V_2.$$

De la ecuación 2.4.1 es fácil notar que, al aumentar el área de la entrada a la salida del difusor, la velocidad del flujo al atravesarlo disminuirá. Si ahora se toma en cuenta que el flujo es prácticamente estacionario y que la viscosidad del aire es muy pequeña y despreciable lejos de las paredes del difusor; es posible utilizar la ecuación de Bernoulli 1.1.6 para describir su desarrollo. Tomando en cuenta que, dado un nivel, el término gz será igual a la entrada y a la salida del difusor, la ecuación de Bernoulli en este caso queda:

$$(2.4.2) \quad \frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2}.$$

De ella se puede deducir que, al disminuir la velocidad del flujo cuando éste atraviesa el difusor, la presión estática del mismo deberá aumentar. Este razonamiento concuerda con el hecho de que el propósito principal del difusor es reducir la presión dinámica (que corresponde a la energía cinética, la cual, como se vio en la sección 1.1.1, es proporcional al cuadrado de la velocidad); y al mismo tiempo incrementar la presión estática.

En [16] se hace un análisis similar y se afirma que un difusor es más eficiente mientras más favorezca el aumento de la presión estática y la disminución de la presión dinámica. Para ello primero define el

coeficiente de recuperación de presión estática ideal:

$$(2.4.3) \quad C_{p_{ideal}} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}.$$

En donde se ha usado la definición de presión dinámica $q = \frac{1}{2}\rho v^2$. De la ecuación 2.4.3 se puede deducir que, dado que las velocidades están relacionadas con las áreas del difusor (véase ecuación 2.4.1), la geometría del mismo afectará al coeficiente de recuperación estática aún en el caso ideal. Por otro lado el coeficiente de recuperación de presión estática real, se define en [16] como:

$$(2.4.4) \quad C_{p_{real}} = \frac{p_2 - p_1}{q_1}.$$

Y la eficiencia η queda definida como:

$$(2.4.5) \quad \eta = \frac{C_{p_{real}}}{C_{p_{ideal}}} = \frac{p_2 - p_1}{q_1 - q_2}.$$

De esta ecuación 2.4.5 puede notarse que efectivamente la eficiencia del difusor es mayor mientras más presión dinámica pase a ser presión estática al atravesar el difusor.

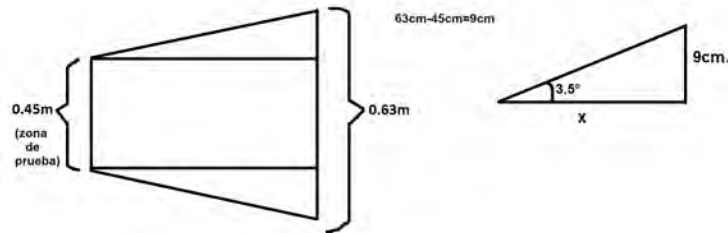


FIGURA 2.4.2. Dibujo utilizado para calcular el largo del difusor.

Ahora falta definir más a detalle los parámetros del difusor. En primer lugar es preciso elegir el ángulo θ al cual diverjan sus paredes. La mayoría de los trabajos previos reportan que lo óptimo es elegir $2.5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$; mientras más se acerque a 5° mayor será la recuperación de presión estática y mientras más se acerque a 2.5° más estacionario será el flujo. Algunos autores [6 y 16] afirman que el valor de θ que es

preferible usar es 3° , valor que además cumple con estar en el intervalo recomendado, por lo que es el elegido para construir el difusor. Una vez determinado este ángulo de divergencia, queda definida también la longitud del difusor, ya que se sabe que la zona de prueba medirá de lado $0.45m$ y, como se verá en la siguiente sección, el extractor mide $0.63m$. Con estos datos y la figura 2.4.2, que corresponde a una sección idealizada a lo largo del difusor, se resolvió la ecuación $\tan(3.5^\circ) = \frac{9cm}{xcm}$. Deduciendo de esta forma que el largo del difusor para el ángulo elegido sería de $x = 1.47m$.

Por otro lado hace falta definir cuál será la geometría utilizada. Para ello se toma en cuenta que en [16] se realizó una simulación en *SolidWorks*, en la cual los resultados mostraron que la eficiencia es mayor en un difusor cuya geometría sea la que empieza cuadrada y termina circular, que en los otros dos tipos de difusores. Dado que en esta referencia es en la única en la que se encontró un análisis cuantitativo que comparara las distintas geometrías que puede tener un difusor, se propone que en el presente trabajo se use un difusor rectangular-cónico y con un ángulo de divergencia de 3° .

2.5. Diseño de la zona de extracción

La zona de extracción se refiere principalmente al extractor mismo. Este dispositivo será el encargado de propiciar que el aire fluya dentro del túnel; hay varios mecanismos gracias a los cuales se crea el gradiente de presión necesario para que este flujo se produzca. El diseño de esta sección conlleva a consideraciones tanto de cómo se llevará a cabo la extracción como de la manera en la que esto afectará positiva o negativamente en la calidad del flujo provocado en la zona de prueba.

Antes de detallar las características del extractor elegido para el túnel de viento, cabe mencionar cuáles son los tipos de dispositivos mediante los cuales se propician flujos, en qué se diferencian y cuál de ellos conviene utilizar según el flujo deseado y las características específicas del túnel de viento. Además es preciso considerar diversos factores de un extractor como son el ruido, la velocidad de rotación, las variaciones en las condiciones de operación y el precio.

Los ventiladores y extractores son aparatos con muchas similitudes y cuyos nombres con frecuencia se usan indistintamente. A su vez cada uno de estos dispositivos se subdividen en otros grupos según su funcionamiento, los cuales estudiaremos más adelante en la presente sección. La *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) utiliza el concepto de radio específico para diferenciar entre ventiladores y extractores.

$$(2.5.1) \quad \text{Radio específico} = SR = \frac{\text{tasa de presión de descarga}}{\text{presión de succión}}.$$

La ecuación 2.5.1 deja ver que el radio específico se refiere a la comparación entre lo que el dispositivo (ventilador o extractor) succiona por un lado y lo que descarga por el otro. Se dice que en los ventiladores $SR \leq 1.1$; en los extractores $1.1 \leq SR \leq 1.20$ y en las compresoras $1.20 \leq SR$. Esto concuerda con la noción de que un ventilador “empuja” más el aire que un extractor, mientras que este último succiona más el aire. Las compresoras por su parte empujan aún más aire que un ventilador.

En el túnel de viento del presente trabajo conviene utilizar un extractor, ya que éste succiona más aire que un ventilador y por lo tanto mejora la eficiencia del túnel de viento. La eficiencia de un extractor es la tasa entre la potencia transferida al caudal de aire y la potencia liberada por el motor del extractor. Hay varios tipos de extractores:

- Centrífugos: usan un impulsor rotante para mover el aire. Incrementan la velocidad conforme las aspas se mueven y luego el incremento de velocidad se traduce en cambios de presión. Son capaces de producir altas presiones y pueden tener distintas formas de aspas, lo cual conlleva a otra clasificación más específica que queda fuera de los alcances de este trabajo.
- Axiales: en éstos el aumento en la presión provocado por este tipo de extractor, es debido a la rotación de las aspas, las cuales imponen una componente tangencial de la velocidad al flujo. El flujo ideal de un extractor axial sería uno en el cual no hubiese

componente radial de la velocidad. Este tipo de extractores suelen ser ligeros y tener un costo no muy elevado por lo que son ampliamente utilizados para diversas aplicaciones. A su vez, los extractores axiales se dividen en extractores de hélice, de tubo y de veleta; los tres tipos tienen el mismo funcionamiento, pero su diseño varía en el hecho de que los de hélice, únicamente la usan para producir y guiar al flujo; los de tubo se parecen a los de hélice pero con una cámara cilíndrica que los contiene y los de veleta se asemejan a los de hélice pero constan de veletas adicionales para direccionar al flujo. Los tres tipos de extractores axiales se muestran en la figura 2.5.1.



FIGURA 2.5.1. Extractores axiales: de hélice, de tubo y de veleta.

La mayoría de los autores que describen el diseño de su túnel de viento, no precisan detalladamente las características de sus extractores. Algunas referencias [20] mencionan la conveniencia de utilizar extractores axiales en túneles de viento. Esto concuerda con el hecho de que los extractores axiales son los que propician una componente tangencial (y no radial) en el flujo que es la que se espera en un túnel de viento. Aunque los extractores axiales de tubo y de veleta presentan ciertas mejoras con respecto a los de hélice, estos últimos son más ligeros y baratos, por lo que uno de este tipo se colocará en el túnel de viento.

Una última característica de gran importancia es el tamaño del extractor, ya que de eso y del tamaño de la zona de prueba dependerá el

ángulo de expansión del difusor. Para que las mediciones coincidan de la manera deseada como se mencionó en la sección 2.4, se determinó que el diámetro del ventilador debía ser de entre 60 y 70cm. Al buscar extractores que se adecuaran a esta y a las demás características deseadas se encontró la marca Soler&Palau, en particular su modelo de extractor axial HIB-630, el cual mide 63cm. de diámetro. El fabricante reporta que la velocidad de este extractor es de 515 revoluciones por minuto; tiene una potencia de 1/4 de caballo de fuerza y su caudal a descarga libre es de $7050m^3/hr = 1.96m^3/s$.

Con el valor del caudal reportado por el fabricante, se puede calcular la velocidad en las distintas secciones del túnel de viento tomando en cuenta sus áreas transversales. En primer lugar ha de calcularse la velocidad en la zona donde se encuentra el extractor, por la cual salen $7050m^3/hr = 1.958m^3/s$ en un área circular de

$$A_{extractor} = \pi\left(\frac{0.63m}{2}\right)^2 = 0.312m^2.$$

Por lo tanto la velocidad del aire perpendicular a la sección transversal del extractor en esta sección es:

$$V_{extractor} = \frac{1.959m^3/s}{0.312m^2} = 6.282m/s.$$

Con la ecuación 2.4.1, es posible obtener la velocidad en las demás secciones del túnel. En particular interesa saber cuál es la velocidad esperada en la zona de prueba:

$$V_{z.prueba} = \frac{(0.312m^2)(6.282m/s)}{(0.45m)^2} = 9.671m/s.$$

Será preciso confirmar una velocidad de este orden de magnitud en la zona de prueba. Es importante notar además, que esta velocidad es la máxima que se podrá alcanzar con el extractor utilizado, pues es la que se alcanza con el caudal al cual llega este dispositivo según el fabricante. En el caso del túnel de viento será necesario poder regular la velocidad en la zona de prueba, por lo que debe regularse el flujo de aire que extraiga. Sin embargo el giro del motor del extractor no depende del voltaje, sino de la frecuencia. Por ello, no bastará con utilizar un

variac para variar la velocidad del flujo sino que se necesita un aparato capaz de regular la frecuencia de la señal. Un dispositivo de este tipo se llama cicloconvertor y puede ser implementado más adelante en el túnel de viento. Por el momento este túnel tendrá la desventaja de sólo trabajar con la máxima velocidad del ventilador. Esta situación es relativamente fácil de arreglar con el cicloconvertor y no se llevó a cabo debido a que este dispositivo tiene un precio elevado, pero queda como trabajo a futuro.

Capítulo 3

Construcción de un túnel de viento

La construcción del túnel de viento se llevó a cabo sección por sección y posteriormente se unieron unas a otras. El orden en el que se presenta la construcción de cada sección en este capítulo corresponde al orden cronológico real en el cual se fueron construyendo. Este capítulo hace referencia tanto a los materiales de construcción como a las herramientas y la forma en la que se hizo cada parte del túnel.

3.1. Construcción de la cámara de asentamiento

Para construir la cámara de asentamiento, el primer paso fue armar una base de madera sobre la cual descansara el *honeycomb* y al menos una de las mallas para laminarizar el flujo; en esta parte se colocó también la cámara de humo. Se cortaron 4 rectángulos de triplay de medidas de $0.45m \times 1m$. Todos ellos se lijaron, se pintaron de negro y se barnizaron con el propósito de darles mejor apariencia y sobretodo mayor durabilidad y resistencia. Posteriormente se unieron formando un cuadrado como el que se muestra en la figura 3.1.1. Además, tomando en cuenta que el cono de contracción debe embonar en la cámara de asentamiento sin que esta unión provoque bordes que puedan perturbar al flujo, se hizo una endidura de $2mm$, lo cual corresponde a un poco más del ancho de la lámina (la cual tiene un grosor de $1.2mm$, pero puede volverse más ancha con la pintura que se le agregue), para que sea allí donde se unan ambas partes. Esta hendidura también puede observarse en la tabla mostrada en la figura 3.1.1. Las 4 tablas se unieron tanto utilizando pijas como pegamento *no más clavos* para madera.

El siguiente paso fue colocar el *honeycomb* en la estructura de la cámara de asentamiento. Se buscaron *honeycombs* ya hechos con formas cuadradas o hexagonales para que no hubiera huecos entre unas celdas

y otras. Sin embargo los *honeycombs* encontrados se venden¹ generalmente con fines de ventilación a empresas, por lo cual son demasiado grandes. Además, están hechas de aluminio o algún otro metal, por lo que se vuelven demasiado pesadas. Un último inconveniente es el precio (de alrededor de \$1500 por m^2 , pero comprando al menos $7.5m^2$). Debido a estos tres factores desfavorables se construyó un *honeycomb* mucho más ligero y económico construido al pegar popotes con silicón. Los popotes tenían ligeras variaciones de tamaño al comparar unos con otros, sin embargo se determinó que en promedio cada popote mide $26.7cm$ de largo y $0.73cm$ de diámetro.

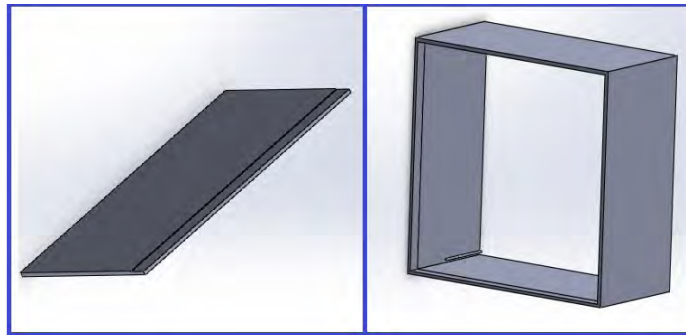


FIGURA 3.1.1. Tabla y estructura de la cámara de asentamiento realizadas en *SolidWorks* siguiendo cuidadosamente la forma real en la cual se construyeron de madera triplay. En la tabla se logra observar la endidura de $2mm$ hecha para que sea allí donde embone la lámina del cono de contracción.

¹Las empresas que se encontró que venden *honeycombs* son: “Alucoil”, “Zhangjiagang Jianglian Precision Machinery Co., Ltd.”, “River Billow Honeycomb” y “Technova Soluciones Innovadoras”.

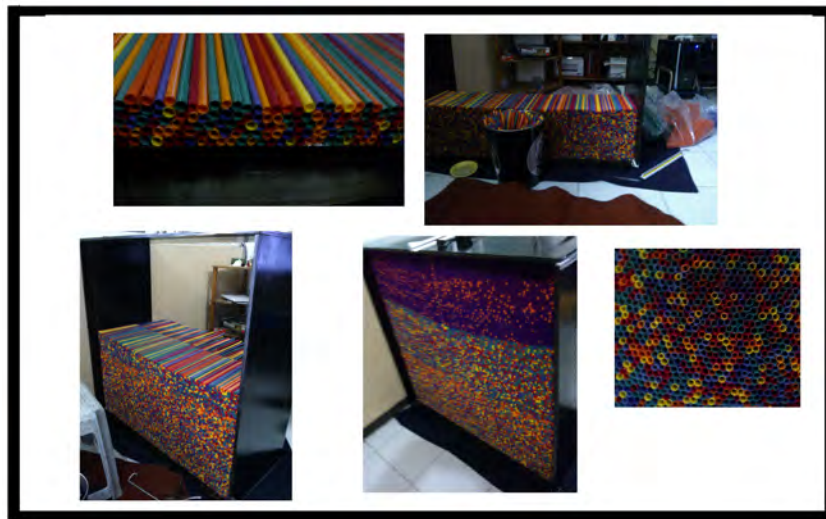


FIGURA 3.1.2. Construcción del *honeycomb* con popotes.

Cabe mencionar que las celdas hechas con popotes, pesaron en total alrededor de $25kg$ por lo que queda claro que, de haber usado otro material más pesado, la cámara de asentamiento se volvería muy difícil de manejar. El trabajo de pegar los popotes uno a uno con silicón fue largo, sin embargo al trabajar en ello días completos, se terminó casi en su totalidad en un lapso de una semana.

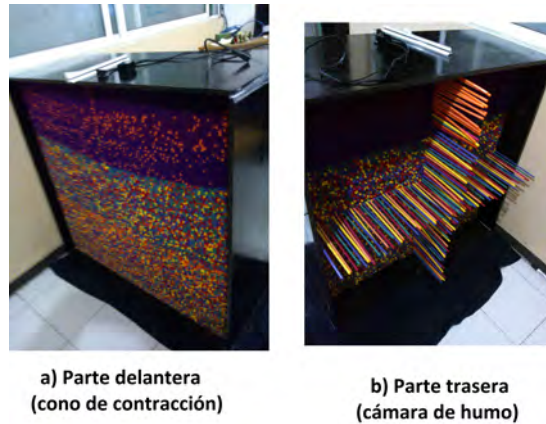


FIGURA 3.1.3. Vistas delantera y trasera del *honeycomb* terminado. La parte delantera del mismo corresponde a la que se une con el cono de contracción y la parte trasera deja ver una cruz de popotes más largos, en la cual se coloca la cámara de humo.

Una razón más para construir manualmente el *honeycomb* fue el hecho de que se requería tener dos hileras de celdas más largas que el resto: una horizontal y la otra vertical. Estas hileras largas servirían para suministrar de humo a ciertas celdas en específico, las cuales fueran susceptibles a visualizarse. Para esto se construyó una cámara de humo como se explicará al final de la presente sección. En la figura 3.1.3 se observa el *honeycomb* terminado; así como sus vistas delantera y trasera, en la última de las cuales se muestran las hileras más largas de popotes.

Aunque los popotes son circulares y dejan huecos al colocarse unos a lado de otros, en conjunto forman un *honeycomb* bastante parejo que ya ha sido utilizado en otros túneles de viento [7, 8 y 14] en los cuales han funcionado satisfactoriamente. Se calculó que se utilizaron alrededor de 20,000 de ellos, cada uno de los cuales tenía un diámetro de $0.0073m$ en promedio. Por ello el área de flujo únicamente a través de los popotes es de $A_{flujo\ popotes} = (20,000)\pi(0.00365m)^2 = 0.83m^2$ que dividido entre el área total como indica la ecuación 2.2.1 da como resultado una porosidad de $\beta = 0.85$, ya que el área total en realidad resultó ser de $0.97m^2$ y no de un metro cuadrado exacto. Como se

vio en la sección 2.2, este resultado es satisfactorio, ya que es deseable que la porosidad de los retículos para laminarizar al flujo, sea $\beta \geq 0.8$. Es de esperar que las pérdidas energéticas debidas a este retículo sean suficientemente pequeñas. En cambio una característica que no necesariamente se ajusta a lo recomendado es el hecho de que, con la relación diámetro-longitud de los popotes, no se cumple la ecuación 2.2.2. Esto puede provocar pérdidas energéticas debidas a la capa límite formada en cada popote. Sin embargo, como se discutió en la sección 2.2, esto también puede tener un efecto positivo sobre el flujo en el túnel de viento ya que ocasiona que en cada popote se obtenga un flujo desarrollado. Es posible deducir que este flujo desarrollado en cada popote puede resultar desfavorable para el flujo en general ya que interactuarán el perfil de velocidad de un popote con los de los popotes alrededor de él; sin embargo los posibles vórtices pequeños formados por esta interacción, aún pueden deshacerse al pasar por las mallas para laminarizar el flujo que se colocan a la salida del *honeycomb*.

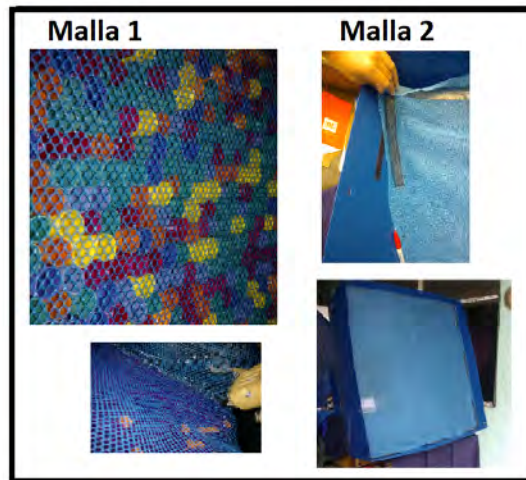


FIGURA 3.1.4. Mallas colocadas en la cámara de asentamiento y en el principio del cono de contracción (ya terminado) para reducir la turbulencia.

La primera de las mallas para laminarizar el flujo consistió en una tela tipo mosquitero que se llama “tela tul” la cual tiene agujeros bastante grandes pero más pequeños que el diámetro de los popotes del

honeycomb; como se observa en la figura 3.1.4. Suponiendo que la malla es suficientemente uniforme, lo cual parece ser una consideración válida con el simple hecho de observarla, se calculó la porosidad de la misma tomando como muestra un pequeño pedazo de ella. Se contó que la cantidad de hoyos en este pedazo era de 225; considerándolos cuadrados y de lado de $0.24 \pm 0.025\text{cm}$, se calcula que el área total ocupada por todos los agujeros es de 12.96cm^2 . Por otro lado se midió que el área total del pedazo de tela es de $17.64 \pm 0.025\text{cm}^2$. Siguiendo la ecuación 2.2.1 se calculó que la porosidad de la malla 1 es $\beta = 0.73$. Se vio en la subsección 2.2.2, que lo recomendable es que $0.58 \leq \beta \leq 0.8$ para las mallas en la cámara de asentamiento, por lo que se observa que la porosidad de la malla 1 es óptima y se espera que por tanto sea efectiva para reducir la turbulencia. Esta malla 1 se colocó, empleando silicón, en seguida de los popotes.

En cuanto a la segunda malla, ésta consistió también en una “tela tul” pero de agujeros más pequeños que la malla 1. Al hacer consideraciones análogas para calcular la porosidad de la malla 2, se determinó que su porosidad es $\beta = 0.62$, la cual resulta ser menor que la de la malla 1, pero aún se encuentra dentro de los rangos recomendados; por lo que se espera que esta segunda malla también sea eficiente reduciendo la turbulencia. La malla 2 se colocó dentro del cono de contracción, pero en una parte del mismo en la que aún no es considerable la contracción. Esta colocación también se muestra en la figura 2.2.2. Sin embargo al colocar esta segunda malla, fue útil hacerlo de forma que se pudiera quitar y poner fácilmente; ya que, para ensamblar el cono de contracción con la cámara de asentamiento, es necesario que una persona se introduzca en él para colocar los tornillos y, de estar la malla 2 fija, no permitiría colocarlos. Así, se determinó que la malla 2 se colocara con ayuda de tiras de velcro, que se pegaron a la campana (a 8cm de distancia de donde quedara la malla 1 como se recomienda en [7]).

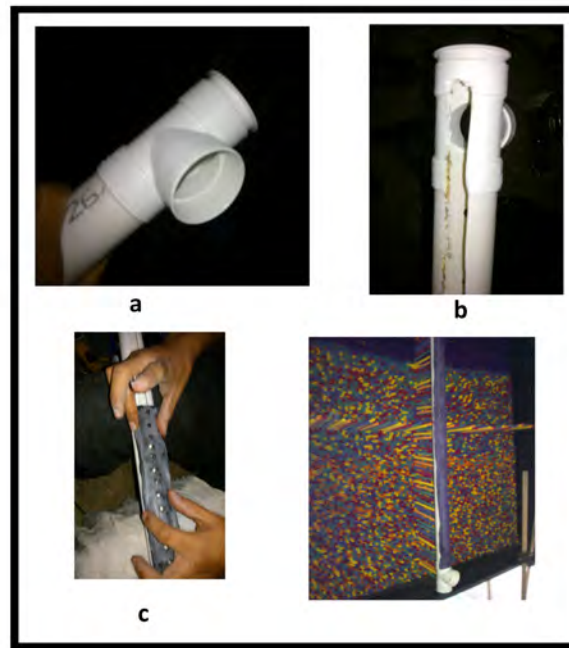


FIGURA 3.1.5. Cámara de humo construida. En a) se observa la parte inferior del tubo con la conexión necesaria para introducir el humo. En b) se deja ver laendidura hecha al tubo de PVC para allí colocar la cámara de llanta agujerada como se muestra en c). Finalmente en d) se observa la cámara de humo acabada y colocada en la hilera vertical de popotes, además puede notarse la tela (morada) utilizada para tapar los hoyos traseros que se le dejaron al tubo de PVC a manera de “respiraderos”.

En cuanto a la cámara de humo, tal y como se mencionó en la sección 2.2, se colocó dentro de la cámara de asentamiento. También se mencionó que se dejarían dos hileras de celdas (popotes) una horizontal y otra vertical, que fueran más largas que todas las demás hileras, para que de esta forma fuera posible conducir las al recipiente que contenga al humo. En principio sólo se construyó el recipiente para la hilera vertical de popotes, ya que es más fácil colocar la cámara fotográfica o de video a un lado de la zona de prueba que sobre de ella a la hora de visualizar. La cámara de humo consistió en un tubo de policloruro de vinilo, mejor conocido como PVC. A este tubo se le realizó una

endidura a lo largo en forma rectangular de alrededor de 1cm de ancho. En ella se pegó con silicón una tira de cámara de llanta agujerada de tal manera que coincidiera con los popotes verticales del *honeycomb*. En la parte de abajo del tubo de PVC se colocó una unión como se muestra en la figura 3.1.5 para que sea en esta conexión donde se introduzca el humo. Al considerar que, mientras los popotes succionen el humo se podría crear una zona de menor presión que la atmosférica, lo cual podría ocasionar que después de un tiempo no se succionara bien; se le dejaron algunos agujeros al tubo de PVC y se cubrieron con una tela porosa llamada “tela shifón”. Con esta tela se espera que el humo no salga demasiado de la cámara de humo, pero que el aire circundante sí pueda entrar a dicha cámara.

De esta forma el humo que se emite en el tubo de PVC, llega a la zona de prueba, haciendo posible que el flujo en ella se pueden visualizar; dando lugar a la técnica mencionada en la subsección 1.3.

3.2. Construcción del cono de contracción

Para construir el cono de contracción lo primero que se hizo fue, a partir de la ecuación 2.3.6, imprimir un molde de PVC con la forma de la curva descrita por dicha ecuación. El molde, que puede observarse en la figura 3.2.1, se cortó utilizando una caladora y se colocó sobre la lámina para marcar la curva deseada con un plumón. Los cortes rectos de lámina pueden efectuarse rápidamente utilizando una cortadora de disco. Sin embargo en este caso se requieren cortes curvos que son difíciles de llevar a cabo con el disco; lo que se utilizó en cambio fue una herramienta con la que se corta la lámina mucho más lentamente, pero de manera eficaz y siendo posible cortarla redondeada. Tal herramienta se conoce como cizalla y también se muestra en la figura 3.2.1.

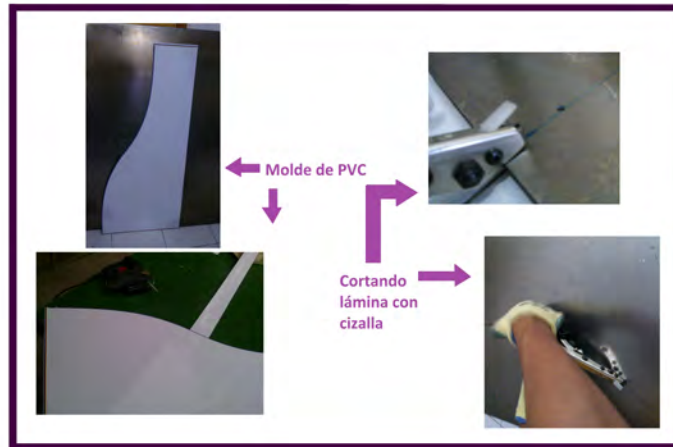


FIGURA 3.2.1. A la derecha se muestra el molde de PVC utilizado para marcar la curva deseada en la lámina. A la izquierda se observa el inicio de los cortes de lámina llevados a cabo con la cizalla.

Cabe mencionar que cada una de las 4 placas de lámina que más tarde formarían las paredes del cono de contracción, se cortaron unos 10cm . más anchas de lo que se requerían en la práctica al formar dicho cono; esto con la finalidad de dejarles una “ceja” de cada lado, gracias a la cual pudieran remacharse para ser unidas posteriormente. Esta ceja se muestra en la figura 3.2.2.

Una vez cortadas las 4 paredes que formarían el cono de contracción, se les realizó una endidura que separara la parte correspondiente a la “ceja” y la correspondiente al interior del cono, para que de esta forma pudiera doblarse con facilidad el borde completo de la lámina. Posteriormente se dobló y se fueron remachando las 4 paredes poco a poco como se muestra en la figura 3.2.2.



FIGURA 3.2.2. Se muestran tanto las “cejas” dobladas al borde de la lámina para poder remacharla, como el ensamblaje de la misma para formar el cono de contracción. Este primer ensamblaje efectivamente se realizó poco a poco por medio de remaches como se muestra en las fotografías.

Aunque se logró ensamblar completamente el cono de contracción mediante los remaches, se consideró que éstos no serían suficientemente buenos para mantener la estructura de manera sólida y sin vibrar² cuando ya se hubiera completado el túnel de viento. Por ello se decidió que debía soldarse el cono de contracción, lo cual se llevó a cabo y gracias a ello fue posible incluso quitar las cejas del cono para que éste fuera más estético y sobretodo más fácil de cargar y manejar.

Una vez soldado, se lijó cuidadosamente para evitar bordes que pudieran perturbar al flujo y luego se le agregó pintura anticorrosiva epóxica, mejor conocida como “primer”. Sin embargo había inuniformidades importantes en las orillas de la lámina debidas a la soldadura, por lo cual se le puso silicón pintable de manera que se emparejaran las orillas. Esto se muestra en la figura 3.2.3. Además se realizaron hoyos

²Puede haber vibraciones debidas al extractor, las cuales podrían ser capaces de debilitar los remaches.

en el cono de contracción con la ayuda de un taladro, para que se le pudieran poner tornillos y de esta forma unirlo tanto a la cámara de asentamiento como a la zona de prueba.

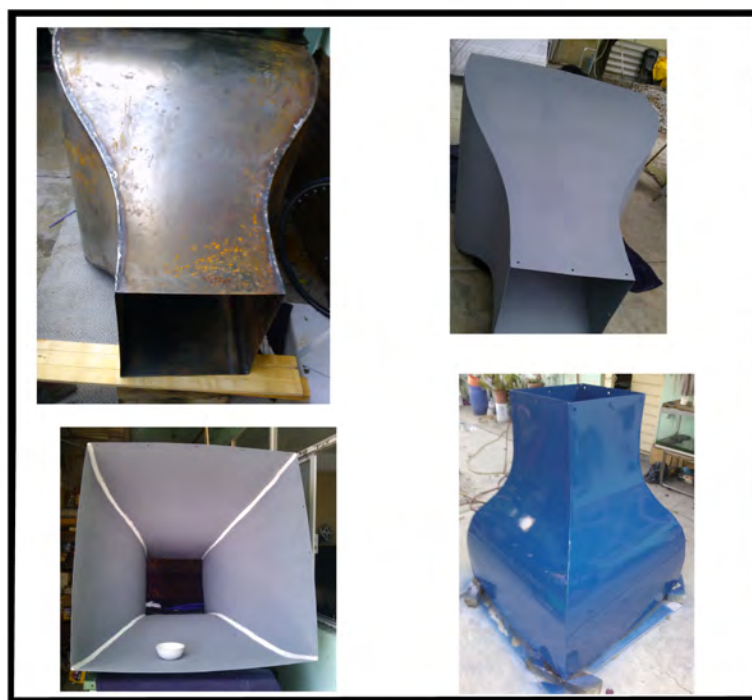


FIGURA 3.2.3. Se observa el cono de contracción soldado y al cual se le habían quitado ya las cejas. Luego se muestra el mismo cono habiéndosele agregado con aerosol la pintura anticorrosiva epóxica. En seguida se observa con el silicón en las orillas para quitar los bordes indeseados debidos a la soldadura y finalmente ya pintado de azul y con el recubrimiento transparente para protegerlo.

Una vez colocado el “primer” y el silicón en las orillas soldadas, se procedió a aplicar la pintura al cono de contracción y posteriormente un recubrimiento transparente que protege a la pintura. Todos estos solventes se colocaron con ayuda de una pistola especial del tipo utilizado para pintar automóviles. Finalmente se pulió el interior del cono de contracción utilizando cera para pulir autos; de esta forma quedó bastante liso y se espera que esto contribuya favorablemente al flujo.

3.3. Construcción del difusor

Como se mencionó en la sección 2.4, en la cual se estudia el diseño del difusor, la forma más eficiente de construir esta sección del túnel es dándole una forma que inicie con un rectángulo y termine en forma de anillo que embone con el extractor. Este diseño particular de difusor dificultó en gran medida la construcción del mismo y requirió de un arduo y largo trabajo sólo para ensamblarlo; ya que fue necesario idear la forma en la que la lámina (calibre 18) se “moldeara” correctamente para pasar de cuadrado (en la zona de prueba) a circular (en el extractor) .

Para la construcción del difusor, lo primero que se hizo fue un cilindro de lámina de 25cm de altura, pero de diámetro suficiente (63cm) para que rodeara al ventilador ensamblándose en él; y a la vez sirviera de estructura para darle soporte al resto del difusor. A continuación se cortaron cuatro triángulos de la misma lámina, que de base tuvieran las medidas de la zona de prueba (alrededor de 45cm) y de altura 1.47m tal y como se mencionó en la sección 2.4. Las bases de estos triángulos se unieron formando un rectángulo mediante soldadura eléctrica como se muestra en la figura 3.3.1. Posteriormente se unieron las puntas de los mismos triángulos a cuatro puntos equidistantes en el cilindro de lámina.

Hasta ese momento no se había dificultado en gran medida la construcción del difusor, sin embargo lo que siguió fue “rellenar” los huecos entre triángulos, empleando más lámina. Para ello primero se obtuvieron moldes con cartulina de las partes que faltaban por cubrir, y luego se cortaron estas figuras en lámina para así soldarlas a la estructura previa. Sin embargo esto resultó muy complicado, ya que la lámina se colocaba de un lado y se jalaba de tal forma que, aunque el molde estuviera hecho a la medida, ya no ajustaba correctamente en el lado contrario. Aunque al final sí se logró ensamblar de esta forma las partes del difusor, no se realizó esto de la manera prevista, sino uniendo los primeros triángulos no sólo de la base, sino de parte de sus lados, como se muestra en la figura 3.3.1.

Lo anterior conlleva a que al inicio el difusor no sea una expansión sino una ligera contracción que luego suavemente se expande, pero con un ángulo mayor al previsto en 2.4. Esto a su vez provoca que al inicio del difusor la velocidad del flujo aumente ligeramente, incrementándose la presión dinámica y disminuyendo la estática. Posteriormente cuando éste se expande ocurre el proceso inverso y la presión dinámica ahora sí empieza a transformarse en estática.

Aunque la presión dinámica no va disminuyendo continuamente a través del difusor como se había previsto, hay dos buenas razones para pensar que no es un factor que afecte negativamente al flujo en la zona de prueba. La primera razón es que tanto la expansión como la contracción en el difusor tienen ángulos pequeños. por lo que ni la aceleración ni la desaceleración del flujo serán muy abruptas y además no resulta factible que haya desprendimiento de la capa límite en ninguna de las dos zonas. La segunda razón es que, cuando el aire esté pasando por el difusor, habrá transitado ya por la zona de prueba, que es en la que interesa que el flujo sea uniforme y que difícilmente será afectada por lo que ocurra después de ella.

De haber hecho el difusor rectangular, habría podido construirse de manera más sencilla y sin necesidad de que primero se contrajera y luego se expandiera. Sin embargo se consideró más conveniente conservar la forma rectángulo-cónica, ya que ésta beneficia considerablemente la eficiencia del túnel de viento en general al emboquillar al ventilador. Es la eficiencia precisamente uno de los requerimientos más importantes del difusor.



FIGURA 3.3.1. Construcción cronológica del difusor a partir de triángulos de lámina y un pequeño cilindro que embonara en el ventilador.

Se terminaron de “rellenar” los huecos en el difusor utilizando más lámina que básicamente tenía formas triangulares también. Todas estas piezas (13 en total) se unieron mediante la soldadura eléctrica y finalmente se obtuvo la pieza completamente cerrada a la que llamamos difusor. Una vez construido se le quitaron las “cejas” utilizadas para unirlos dejándolo más liso y volviéndolo a soldar por fuera. Además se le removieron las prominencias por dentro y por fuera, utilizando una cortadora de disco, una carda de laladro, un cepillo de alambre y finalmente lijas. Posteriormente se uniformizó aún más el difusor por fuera colocándole pasta para resanar automóviles. Por dentro, al igual que en el cono de contracción, se taparon las inuniformidades debidas a la soldadura utilizando silicón pintable. Después de secada la pasta, se lijó y fue entonces cuando estuvo listo el difusor para aplicarle pintura anticorrosiva epóxica (“primer”).

Para unir al difusor con el extractor, se colocó una tabla de madera triplay a la cual se le hizo un agujero circular del diámetro del anillo del difusor (y por lo tanto del extractor). A esta madera también se le aplicó “primer” y se fijó al difusor, ayudando, de esta forma, a volver a la parte redonda del mismo más circular como se muestra en la figura 3.3.2. Además fue necesario idear la forma en la que la madera circular se uniera con el extractor; para ello se colocaron 4 tornillos con mariposa en las esquinas de la misma, a los cuales fue necesario agregar pedazos de madera para que quedara exacta la unión. Con el objetivo de no dejar fugas entre el extractor y el difusor, se rellenaron con silicón pintable los pequeños huecos formados entre el cilindro del difusor y la madera circular.



FIGURA 3.3.2. Imagen en la que se observa el lijado del difusor, aplicación de pasta, “primer” y ensamblaje del mismo con la base de madera circular.

3.4. Construcción de la zona de prueba

Como se mencionó en la sección 2.1, la zona de prueba se construyó de acrílico. Lo primero que se hizo fue, utilizando acrílico de 6mm de

espesor, cortar las cuatro paredes de 70cm de largo y alrededor de 45cm de ancho (variaban ligeramente unas de otras ya que se tuvieron que ajustar a las estructuras ya construidas de lámina). Posteriormente se lijaron de las orillas para que quedaran suficientemente rectas para ensamblarse unas con otras.

La primera forma en la que se intentó estructurar la zona de prueba fue la propuesta en la sección 2.1, la cual consistía en unir las 4 paredes de la misma y hacerle un agujero y una tapa a una de ellas, tal y como se muestra en la figura 2.1.1. Sin embargo cuando esto se llevó a cabo no se logró que la zona de prueba embonara perfectamente en el cono de contracción y en el difusor; lo cual provocaba que hubiera fugas. Además, la tapa no quedaba uniforme sino que formaba un escalón que podría perturbar al flujo. Fueron estas razones suficientes para cambiar el diseño de la zona de prueba.

Lo primero que se hizo ahora fue colocar el cono de contracción y el difusor uno frente al otro de tal forma que entre ellos quedara justamente el espacio correspondiente a la zona de prueba. En este espacio se fueron fijando las paredes una a una y, usando ángulos de aluminio encontrados “hacia afuera”, se sellaron las paredes de la zona de prueba con el cono de contracción y el difusor respectivamente como se muestra en la figura 3.4.1. Una vez fijadas estas paredes, se juntaron unas con otras sellando esta unión mediante más ángulo de aluminio. Además cabe mencionar que, tal y como se propuso en el capítulo 2, se hizo diverger alrededor de $1/2$ grado cada pared de la zona de prueba; esto conllevó a que las paredes no fueran cada una rectangulares sino que fueran un poco más anchas en la parte correspondiente al difusor. En cuanto a la tapa, ya no se realizó haciendo un agujero rectangular en una de las paredes laterales, sino que se permitió que dicha pared se pudiera separar fácilmente de las demás. Para esto se construyó de tal forma que, al unirla con las demás, embonara perfectamente y, para llevar a cabo esta unión movable, se utilizaron 3 bisagras. Además en las uniones de esta pared con las demás se colocó cámara de llanta para eliminar las fugas.

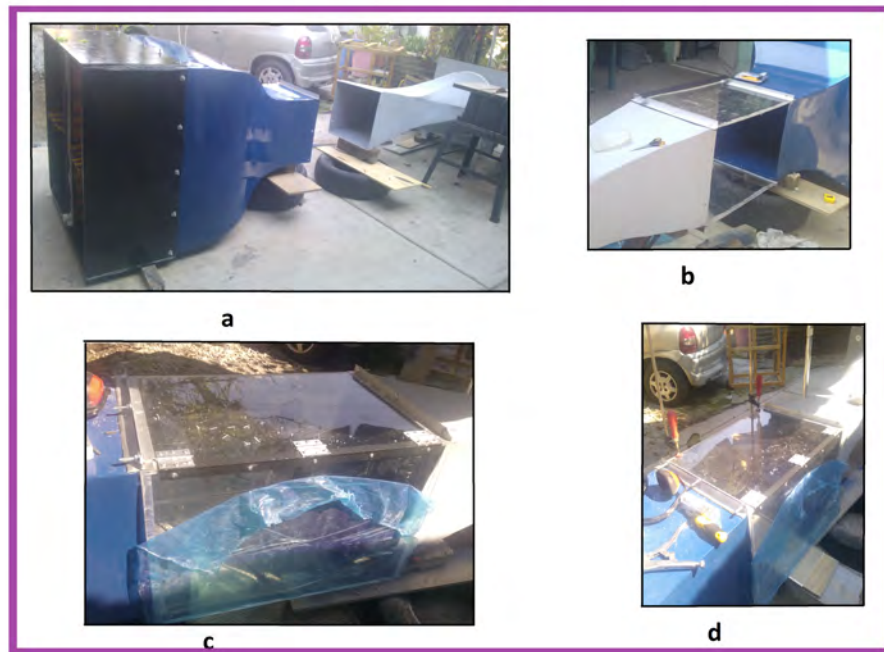


FIGURA 3.4.1. Construcción y ensamblaje de la zona de prueba. a) Colocación del cono de contracción y el difusor encontrados para introducir entre ellos los acrílicos. b) Colocación de los acrílicos de arriba y de abajo utilizando ángulo de aluminio remachado al cono de contracción y al difusor. c) Colocación, mediante bisagras, de la pared que serviría de tapa para la zona de prueba. Además se observa que fue necesario rebajarle las orillas mediante un router para madera, para que la tapa se ajustara de manera precisa al resto de la zona de prueba. d) Colocación de ángulo de aluminio entre una pared de acrílico y otra, para que no hubiera huecos entre ellas que pudieran perturbar al flujo.

3.5. Ensamblaje del túnel de viento

Una vez construidas casi todas las partes del túnel de viento (la excepción fue la zona de prueba), se procedió a unirlas. Lo primero que se hizo fue unir el difusor al extractor de la forma descrita en la

sección 3.3. Por otro lado se ensamblaron la cámara de asentamiento y el cono de contracción utilizando tornillos, rondanas y tuercas que hubo que poner de adentro hacia afuera para que el largo del tornillo no perturbara al flujo. Se colocaron 20 de ellos, 5 en cada lado. Una vez colocados, se pudo poner también la malla 2 con velcro como se había planeado en la sección 3.1. En seguida se pusieron frente a frente el cono de contracción y el difusor para construir y ensamblar la zona de prueba. Cabe mencionar que, para colocar cada una de las secciones, fue necesario ajustar su altura con respecto a las demás. Para ello se utilizaron gatos mecánicos y objetos de distintos tipos para calzar correctamente las distintas partes del túnel. En la figura 3.5.1 se observa el túnel de viento por fin terminado y listo para evaluarse, caracterizarse y usarse.



FIGURA 3.5.1. Se observa al lado izquierdo la ejecución de los últimos detalles del túnel de viento, que consistieron en montar la zona de prueba. Al lado derecho se muestra el túnel de viento ya listo para usarse; la prensa observada en la zona de prueba corresponde al mecanismo inmediato mediante el cual se puede cerrar herméticamente esta sección. Posteriormente puede diseñarse otro mecanismo que no involucre la utilización de la prensa.

Mediciones y visualizaciones en el túnel de viento

4.1. Velocimetría con un anemómetro de veleta

Como se mencionó en el capítulo 1, es deseable caracterizar con precisión el flujo obtenido en el túnel de viento. Sin embargo para llevar esto a cabo es imprescindible un dispositivo capaz de detectar con mucha precisión el campo de velocidad en la zona de prueba. Como se mencionó en la sección 1.3, dos técnicas que adquieren el perfil de velocidad satisfactoriamente y que son capaces de detectar la turbulencia, son el P.I.V y la anemometría de hilo caliente. Sin embargo el lugar en el que se construyó el túnel de viento no es un laboratorio, sino una casa particular y, aunque posteriormente será llevado a la Facultad de Ciencias, por el momento no fue posible utilizar el equipo necesario en el túnel para hacer pruebas ni de P.I.V. ni de anemometría de hilo caliente. Por ello no se midió velocidad en la zona de prueba con gran precisión ni se logró medir el nivel de turbulencia en la misma. Sin embargo sí se midió la velocidad con un anemómetro menos preciso: el anemómetro portatil de veleta modelo TPM-AMF006. Este anemómetro mide la velocidad del viento en metros sobre segundo en un rango de $0.3 - 30m/s$ y con una precisión de $\pm 0.1m/s$. Además es capaz de medir la temperatura en $^{\circ}C$ con una incertidumbre de $\pm 3\%$. Como se mencionó en la sección 2.5, la velocidad esperada en la zona de prueba sin considerar las pérdidas es de $9.671m/s$, por lo que el rango de velocidades que es posible obtener en el túnel de viento es medible con el anemómetro de veleta utilizado.

4.1.1. Montaje experimental.

El anemómetro de veleta tiene las desventajas de no tener una gran precisión, no medir de manera confiable las fluctuaciones de la velocidad y ser considerablemente ancho y largo como para no despreñar su intromisión en el flujo. Sin embargo es perfectamente capaz de proveer una estimación de la velocidad que permita saber si ésta está dentro del rango esperado o no. Además es posible aproximar un perfil de velocidad en la zona de prueba al colocarlo en distintas posiciones dentro de ésta. Fueron éstas precisamente las mediciones realizadas con el anemómetro de veleta. Para ello se hizo una cuadrícula pegando cinta “masking tape” en el piso de la zona de prueba y midiendo en las distintas posiciones horizontalmente. Posteriormente se fijó una posición horizontal y se hicieron más mediciones de velocidad variando la posición vertical del anemómetro. El sencillo montaje experimental utilizado para tomar estas mediciones de velocidad se muestra en la figura 4.1.1.



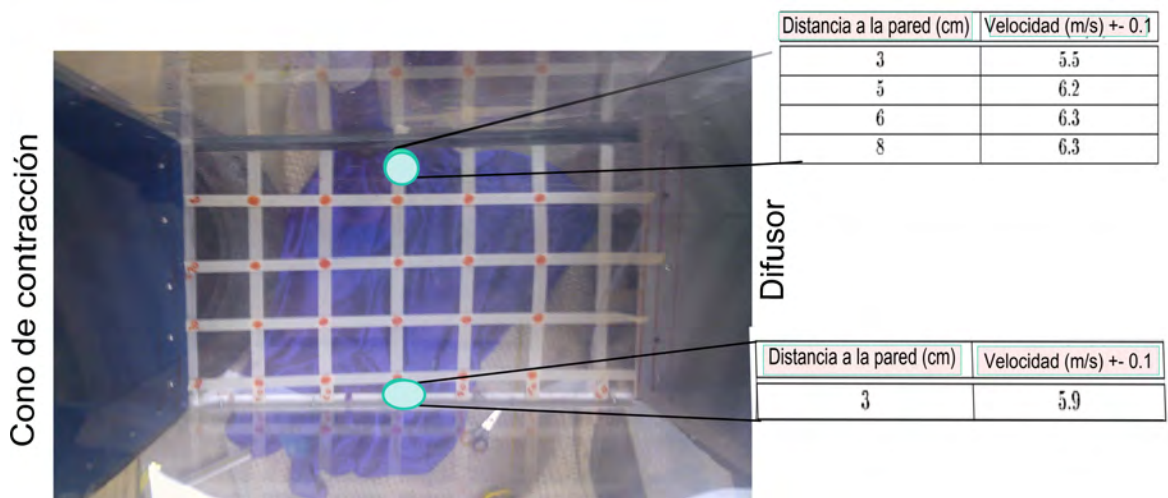
FIGURA 4.1.1. Medición de la velocidad en distintos puntos de la zona de prueba utilizando el anemómetro de veleta.

4.1.2. Resultados y análisis.

Al medir las velocidades como se describió en la subsección anterior, se obtuvo una aproximación del perfil de velocidad. Las primeras velocidades se midieron variando la posición horizontal del anemómetro,

pero conservando su posición vertical a 24cm del piso de la zona de prueba, que es a la mitad de la altura de la misma.

Distancias	20cm del C.C.	30cm del C.C.	40cm del C.C.	50cm del C.C.
10cm de P1	$6.4\text{m/s} \pm 0.1$	$6.3\text{m/s} \pm 0.1$	$6.3\text{m/s} \pm 0.1$	$6.4\text{m/s} \pm 0.1$
20cm de P1	$6.4\text{m/s} \pm 0.1$	$6.3\text{m/s} \pm 0.1$	$6.3\text{m/s} \pm 0.1$	$6.3\text{m/s} \pm 0.1$
30cm de P1	$6.3\text{m/s} \pm 0.1$	$6.4\text{m/s} \pm 0.1$	$6.3\text{m/s} \pm 0.1$	$6.3\text{m/s} \pm 0.1$
40cm de P1	$6.5\text{m/s} \pm 0.1$	$6.5\text{m/s} \pm 0.1$	$6.4\text{m/s} \pm 0.1$	$6.4\text{m/s} \pm 0.1$



CUADRO 1. Medición de la velocidad a lo largo de la zona de prueba horizontalmente. En la tabla de arriba se observan las mediciones realizadas en la celda de 10cm de ancho trazada en la zona de prueba (corresponden a los puntos rojos de las fotografías). En la fotografía de abajo y sus tablas se muestran mediciones más finas hechas cerca de las paredes de la zona de prueba todas a 30cm del cono de contracción (C.C.). Las distancias se toman respecto al cono de contracción (C.C.) y respecto a la pared 1 de la zona de prueba (P1) que es la que no tiene tapa.

Al dibujar las variaciones de la velocidad con la distancia horizontal en la zona de prueba, es posible obtener un bosquejo del perfil de velocidad. Dicho bosquejo se muestra en la figura 4.1.2.

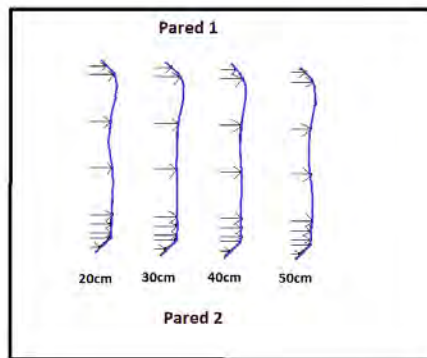


FIGURA 4.1.2. Bosquejo de los perfiles de velocidad horizontal en la zona de prueba usando los datos del cuadro 1. Las distancias marcadas se miden respecto al cono de contracción.

Aunque el perfil de velocidades dibujado es únicamente una aproximación del perfil real en la zona de prueba; en él es posible percibir que las velocidades lejos de las paredes son más o menos uniformes. Las variaciones en esta zona son del orden de $0.1m/s$, lo cual es la incertidumbre del anemómetro; por lo que no se consideran demasiado grandes, sino que pueden atribuirse al aparato de medida. Además puede notarse que mientras el flujo avanza a lo largo de la zona de prueba, su velocidad se uniformiza cada vez más. En cambio, muy cerca de las paredes (a $3cm$ de ellas), las velocidades ya no son de $\sim 6.4m/s$, sino que bajan a menos de $5.8m/s$. Esto se debe a la presencia de la capa límite. Cabe resaltar que la disminución de la velocidad debida a la capa límite, es notoria sólo muy cerca de la pared, a $5cm$ de separación de cualquiera de las paredes, la velocidad se uniformiza. Por ello es posible afirmar que el perfil de velocidad que se aproxima en la presente sección, es considerablemente parecido al mostrado en la figura 1.1.3, el cual es el esperado en el túnel de viento por las razones expuestas en la subsección 1.1.5. Sin embargo no debe olvidarse que el método usado para obtener el perfil de la figura 4.1.2 es simplemente una aproximación realizada a partir de las mediciones tomadas por

un anemómetro de hélice. Para obtener un perfil de velocidades más confiable debe medirse mediante P.I.V. o anemometría de hilo caliente.

Por otro lado, también se obtuvieron mediciones verticales sobre una sólo posición horizontal de la zona de prueba. Esta posición fue a 30cm de separación del cono de contracción y a 30cm de la pared 1. En el cuadro 2 se muestran las mediciones obtenidas variando la altura a la que medía el anemómetro.

Distancia del suelo (cm)	Velocidad (m/s) ± 0.1
3	5.7
7	6.3
10	6.3
15	6.3
17	6.3
22	6.2
25	6.2
28	6.3
31	6.2
34	6.2
37	6.1

CUADRO 2. Mediciones de la velocidad en la zona de prueba en una posición horizontal fija y variando la vertical.

Como puede observarse en el cuadro 2, las velocidades obtenidas al variar la altura también son bastante uniformes, con excepción de la obtenida pegando el anemómetro al piso de la zona de prueba; en cuyo caso disminuye 0.6m/s , lo cual no es atribuible a la incertidumbre del anemómetro sino a la capa límite.

En cuanto a la magnitud general de la velocidad en la zona de prueba, puede apreciarse que es de $\sim 6.3\text{m/s} \pm 0.1$; la cual es considerablemente menor que la esperada en 2.5 de 9.671m/s y calculada a partir de la ecuación 2.4.1. Sin embargo dichos cálculos se hicieron considerando únicamente el flujo másico reportado por el ventilador y la disminución en área transversal en la zona de prueba. Para estimar la

velocidad real esperada en la zona de prueba era preciso calcular las pérdidas energéticas a lo largo del túnel de viento. Como puede recordarse de la sección 1.2, al fluir el aire en las distintas secciones del túnel, experimenta una resistencia hidráulica ocasionada tanto por la viscosidad misma del fluido como por perturbaciones del flujo medio. Aunque en el presente trabajo no se cuantificaron las pérdidas energéticas experimentalmente, es posible atribuir a ellas el hecho de que la velocidad en la zona de prueba sea $3m/s$ menor a la calculada sin contemplar pérdidas energéticas.

4.2. Visualizaciones con humo

Un propósito fundamental del túnel de viento era que en él se pudieran hacer visualizaciones confiables en las que el flujo en ausencia de objetos se viera laminar y en presencia de ellos se viera afectado únicamente por los objetos y no por influencia de alguna particularidad del túnel. Para llevar a cabo esta caracterización de las líneas de flujo en el túnel es preciso realizar visualizaciones con humo tanto manteniendo la zona de prueba vacía, como introduciéndole objetos de distintas formas y comparando el flujo observado alrededor de ellos con el reportado en libros o artículos. Es precisamente este trabajo el reportado en la presente sección. Sin embargo debe tomarse en cuenta que, dado que el principal objetivo en el presente trabajo fue el diseño y la construcción del túnel de viento, la caracterización que se expone a continuación es tan solo el principio de una caracterización completa requerida para dar por conocido completamente al flujo obtenido en este túnel de viento y poder usarlo con propósitos de investigación.

4.2.1. Líneas de flujo en ausencia de objetos que las perturben.

Lo primero que se hizo fue visualizar el flujo en la zona de prueba sin introducirle ningún objeto. Para llevar a cabo esta visualización se hizo uso de la cámara de humo cuya construcción se describió en la sección 2.2. Como se había planeado se introdujo humo en dicha cámara colocada en la línea vertical de popotes; además se montó un

láser de $532nm$ y se hizo incidir en una lente cilíndrica para hacer una hoja de luz, tal y como se describió en la subsección 1.3. Gracias a este montaje pudo visualizarse el flujo producido en la zona de prueba, el cual se grabó en video con una cámara Sony Handycam que es de alta definición pero únicamente graba 60 cuadros por segundo. En la figura 4.2.1 se muestra que las líneas de flujo observadas son laminares. Sin embargo en dicha imagen se observan algunas líneas de flujo demasiado tenues. Esto se debe mayormente al hecho de que la hoja de luz obtenida con el láser es muy delgada y los popotes verticales pertenecientes a la cámara de humo no se lograron colocar perfectamente alineados unos con otros. Con un *honeycomb* hecho industrialmente todas las celdas de la cámara de humo estarían alineadas y con una hoja de luz aún tan delgada como la obtenida en esta visualización, sería suficiente para observar claramente iluminadas todas las líneas de flujo. Otra manera de solucionar este problema, sería montando no una lente cilíndrica para realizar una hoja de luz, sino un objetivo de microscopio para obtener un cono de luz en el cual efectivamente se iluminarían todas las líneas de flujo sin importar si unas están un poco desalineadas con respecto a otras. Esto no se llevó a cabo ya que no se contaba con el objetivo de microscopio en el lugar donde se encuentra el túnel de viento; sin embargo no es una prueba difícil de hacer y podrá considerarse en el trabajo a futuro.

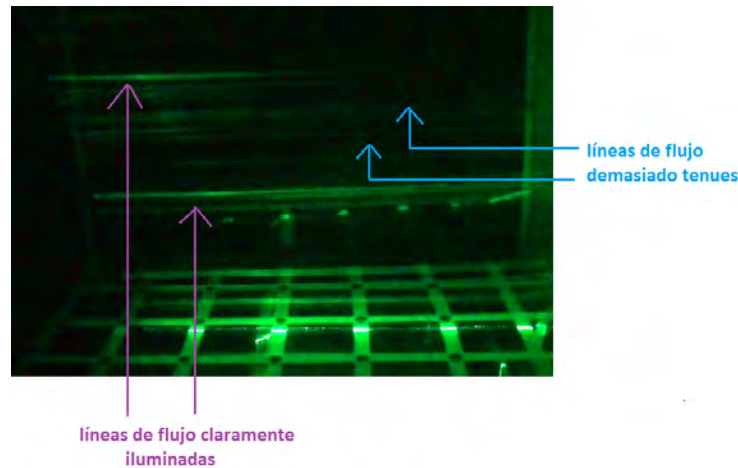


FIGURA 4.2.1. Líneas de flujo en la zona de prueba sin introducirle ningún objeto que las perturben. Estas líneas de flujo se observan laminares.

Aunque no se observan demasiadas líneas de flujo en la figura 4.2.1, es satisfactorio el hecho de que las que se ven son laminares. Al visualizar el flujo alrededor de objetos, se alineó con más cuidado el láser y se acumuló una mayor cantidad de humo en la cámara de humo, por lo que las imágenes obtenidas muestran más líneas de flujo que se ven claramente.

4.2.2. Flujo alrededor de un cilindro.

Con el mismo montaje de humo y hoja de luz mencionado en la subsección anterior, pero mejorando tanto la alineación del láser como la producción de humo; se logró visualizar el flujo alrededor de un cilindro.

Para ciertos números de Reynolds, al pasar un flujo laminar alrededor de un cilindro puede observarse el camino de Von Karman. Sin embargo no siempre se tienen las condiciones necesarias para que esto ocurra. Para $40 \leq Re \leq 80$ la estela formada por los esfuerzos viscosos detrás del cilindro es inestable pero no interacciona con el par de vórtices que se unen a la parte trasera del cilindro; cuando

$80 \leq Re \leq 200$ los vórtices pegados al cilindro se desprenden periódicamente y alternándose en cada uno de los lados del cilindro, de esta forma se observa, dadas estas condiciones, el camino de Von Karman. Para $Re \geq 200$ el camino de vórtices se vuelve inestable e irregular y el flujo entre los vórtices mismos se vuelve caótico.

Para saber qué tipo de flujo alrededor del cilindro se espera visualizar, es preciso calcular el número de Reynolds en el cual se realizó dicha visualización. Para ello se midió el diámetro del cilindro utilizado, siendo éste de $0.065m$. Además se consideró que la viscosidad del aire a $17^\circ C$ (medidos con el anemómetro) es de $\nu = 1.5 \times 10^{-5} m^2/s$ y que la velocidad en la zona de prueba medida en la sección 4.1 es típicamente de $6.3m/s$. Utilizando la ecuación 1.1.7, se calculó que $Re = 27300$, lo cual claramente rebasa el intervalo en el cual se espera observar el camino de Von Karman. En la figura 4.2.2 se muestran las diferentes formas del flujo esperadas según el número de Reynolds. Además, se observan dos fotografías obtenidas del flujo alrededor del cilindro; en las cuales no se ve nada parecido al camino de Von Karman, tal y como se espera debido al elevado número de Reynolds.

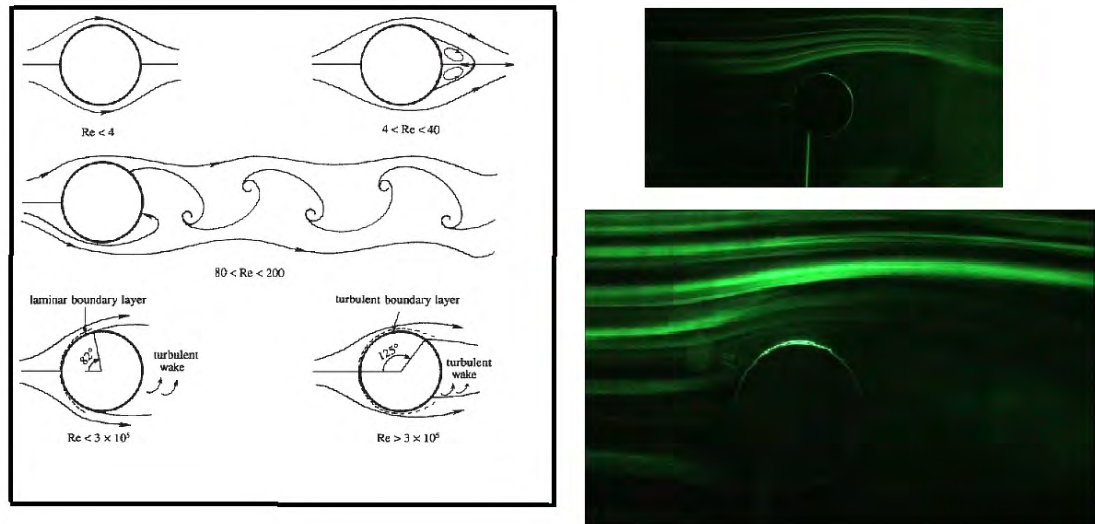


FIGURA 4.2.2. A la izquierda se muestra el camino de Von Karman que, dependiendo de los números de Reynolds, se reporta que se obtiene (Imagen obtenida de [21]). A la derecha se observa la visualización del flujo alrededor de un cilindro obtenida en el túnel de viento.

4.2.3. Flujo alrededor de una pelota esférica.

El siguiente objeto a visualizar fue una pelota esférica de $0.0748m$ de diámetro; lo cual, considerando las mismas velocidades y viscosidades que en el caso del cilindro, conlleva a que $Re = 31416$. Los números de Reynolds del orden de 10^5 son típicamente encontrados en muchos deportes. Una bola de críquet por ejemplo, generalmente viaja a $Re = 5 \times 10^5$, el cual es suficiente para que se dé la transición de la capa límite a un régimen turbulento. Aunque la pelota redonda visualizada en el túnel de viento tiene una rugosidad muy distinta a la de una pelota de críquet, la forma en la que el flujo rodea a ambas es comparable hasta cierto punto. En la figura 4.2.3 se muestra tanto una imagen de cómo es el flujo alrededor de una pelota de críquet según [21], como la visualización obtenida en el túnel de viento de la pelota redonda. En ambos casos se observa cómo, al ser fenómenos a números de Reynolds

altos, la capa límite se separa y, aunque cuando el flujo comienza a pasar por las pelotas es laminar, al pasar por ellas las líneas de flujo se separan y hay cierta turbulencia. En el caso de la pelota de críquet, ésta cambia su dirección debido a la forma en la que el flujo pasa a través de ella y al gradiente de presión. En el caso de la pelota redonda utilizada para la visualización, se encuentra fija y no cambia su dirección, pero se observa cómo la capa límite se separa y no logran verse líneas de flujo en una zona detrás de la bola; lo cual probablemente se debe a que esa zona es turbulenta y la velocidad de adquisición de la cámara no es suficientemente grande como para que se visualicen los vórtices.

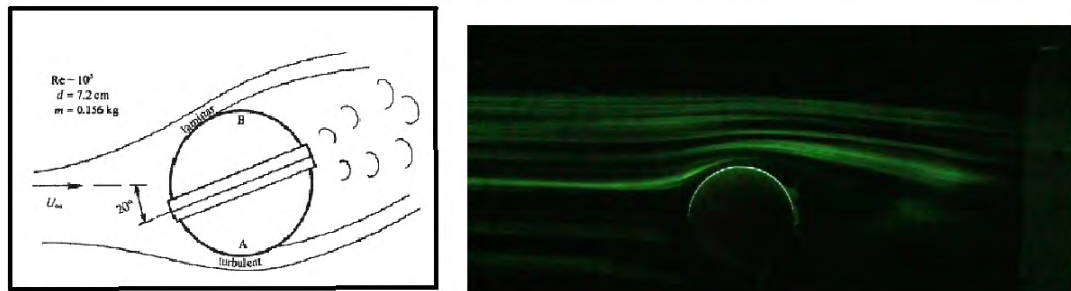


FIGURA 4.2.3. A la izquierda se observa cómo es el flujo alrededor de una pelota de críquet que provoca que ésta cambie un poco su dirección a un $Re \sim 10^5$ (Imagen encontrada en [21]). A la derecha se muestra la visualización obtenida en el túnel de viento del flujo alrededor de una pelota redonda.

4.2.4. Flujo alrededor de un balón de fútbol americano.

El último objeto visualizado fue un balón de fútbol americano cuya longitud es de $0.11m$ por lo que utilizando de nuevo las mismas condiciones de viscosidad y velocidad conlleva a un número de Reynolds de 46200. No se encontraron estudios ni simulaciones de flujos alrededor de un objeto como el balón de americano (que puede considerarse un elipsoide de revolución) a números de Reynolds tan altos, pero en [22] se reporta una simulación, a números de Reynolds un tanto menores,

del flujo alrededor de un elipsoide. Este flujo es bastante complicado de analizar matemáticamente, justamente en [22] se muestra un análisis de este tipo en el cual se utilizan coordenadas apropiadas para ajustarse a la geometría del elipsoide; aún así, resulta no ser nada sencillo y, aunque resolverlo puede ser muy interesante, queda fuera de los propósitos del presente trabajo. En la figura 4.2.4 se muestra la simulación referida y la visualización obtenida en el túnel de viento alrededor de un balón de fútbol americano. Aunque los números de Reynolds difieren en más de un orden de magnitud, en la visualización se observa cómo las líneas de flujo se mantienen pegadas al balón hasta cierto punto que no es drásticamente distinto al de la simulación. En las zonas oscuras detrás del balón se infiere la formación de vórtices que podrían asemejarse a los observados en la simulación. Un estudio posterior debe confirmar este hecho y es deseable disminuir el número de Reynolds para poder comparar más acertadamente lo visualizado con lo simulado en [22]. Sin embargo este estudio por el momento queda como trabajo a futuro, ya que para realizarlo es necesario conseguir el cicloconvertor para regular la velocidad del extractor o idear alguna otra manera en la que dicha velocidad pueda regularse.

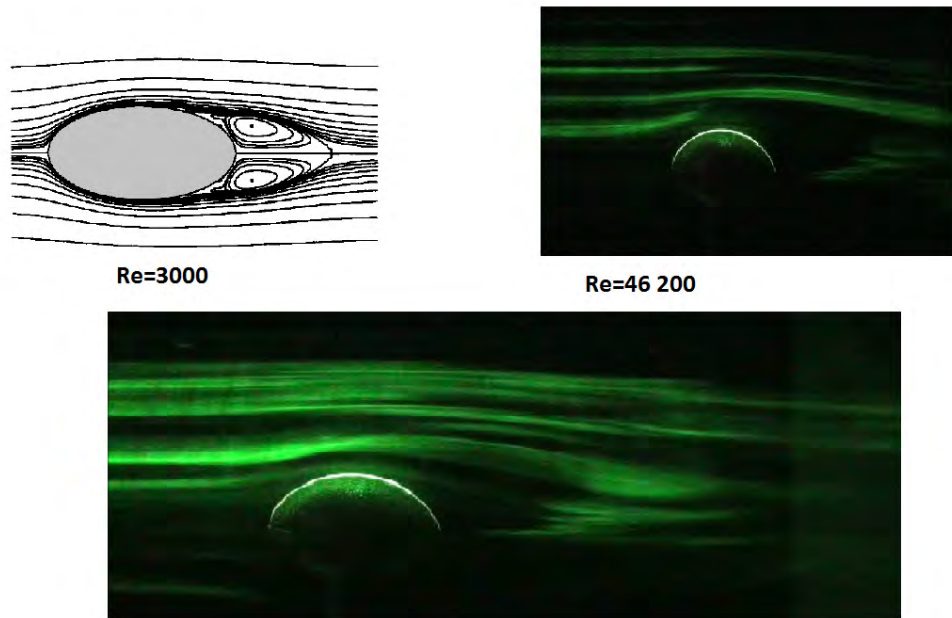


FIGURA 4.2.4. Se muestra el flujo alrededor de un elipsoide obtenido en una simulación en [22] y el flujo observado alrededor de un balón de fútbol americano visualizado en el túnel de viento.

Conclusiones

- El diseño de los túneles de viento es complicado aunque ya ha sido bastante estudiado. Por un lado, varios autores han estudiado el problema de manera analítica utilizando la mecánica de fluidos para intentar predecir qué condiciones son necesarias para obtener el flujo requerido en la zona de prueba. Por otro lado, ha habido estudiosos que, a base de prueba y error, han logrado implementar cada vez mejores diseños de túneles de viento. Ambos tipos de análisis han arrojado resultados útiles en el diseño de túneles de viento y actualmente están bien caracterizadas las condiciones que un buen túnel debe cumplir para obtener en él un flujo laminar y con un perfil de velocidades achatado en la zona de prueba.
- Aunque al seguir las recomendaciones de los distintos autores prácticamente es seguro que se obtenga un buen túnel de viento, el diseño y la construcción no son procesos fáciles. Requirieron del aprendizaje de distintas técnicas para trabajar con materiales de distintas índoles y herramientas diferentes. También se tuvo que aprender a diseñar tanto con cálculos analíticos y numéricos como con software especializado. El proceso no fue nada sencillo y se tuvo que tomar en cuenta el tipo de aplicaciones para las que se utilizará, su versatilidad, manejabilidad, tamaño y costo. El hecho de tomar en cuenta todos estos factores, requirió de mucho tiempo para llevar a cabo este túnel de viento.
- Se logró diseñar y construir un túnel capaz de producir el flujo adecuado en la zona de prueba. Aunque falta hacer más pruebas en esta zona para caracterizar adecuadamente al flujo, las

mediciones obtenidas mediante el anemómetro de veleta, sugieren la existencia de un perfil de velocidades bastante parecido al esperado.

- La magnitud de las velocidades medidas en la zona de prueba, es del orden de la esperada. La diferencia, de alrededor de $3m/s$, se adjudica al hecho de que las velocidades calculadas no contemplan las pérdidas energéticas en el túnel de viento; siendo que éstas sí son considerables. Por un lado los popotes del *honeycomb* son más largos de lo que se recomienda por algunos autores. Por otro lado debe haber pérdidas también debidas a las mallas utilizadas pues, aunque su porosidad se encuentra dentro de los límites recomendados, los agujeros son bastante pequeños lo que hace que las pérdidas aumenten. Además hay fricción del flujo en las paredes de cada sección del túnel de viento.
- Las visualizaciones realizadas dejan ver líneas de flujo laminares en ausencia de objetos, tal y como se esperaba. Además de que esto prueba que el túnel de viento en general funciona correctamente, es una evidencia de que la cámara de humo implementada en él es, a grandes rasgos, útil para visualizar flujos. Sin embargo, para que una delgada hoja de luz fuera suficiente para visualizar todas las líneas de flujo, se requeriría que las celdas del *honeycomb* estuvieran completamente bien alineadas. Para resolver este problema se puede utilizar un alambre caliente con cera frente al objeto.
- El flujo observado en el túnel deja inferir que el cono de contracción efectivamente reduce el nivel relativo de la turbulencia. Además es posible deducir que el *honeycomb* hecho de popotes y las mallas utilizadas lograron uniformizar adecuadamente al flujo.
- A pesar de que el difusor no se hizo exactamente de la manera planeada sino que tiene primero una ligera contracción y luego se expande, esto no pareció afectar negativamente al flujo, pues éste se observa laminar. Sin embargo posiblemente sea la razón

por la cual las velocidades medidas al final de la zona de prueba resultan ser un poco mayores a las obtenidas cerca del cono de contracción.

- Técnicas más precisas como son el P.I.V. y la anemometría de hilo caliente, deberán aplicarse en el túnel de viento para caracterizarlo y evaluarlo adecuadamente y, de esta forma, poder usarlo incluso con fines de investigación.
- En presencia de los tres distintos objetos introducidos en la zona de prueba, logran verse flujos bastante parecidos a los encontrados en [21] para condiciones parecidas en los casos del cilindro y de la pelota esférica y a la simulación reportada en [22] para el flujo alrededor de un balón de fútbol americano. Sin embargo no se logran ver adecuadamente los vórtices detrás de los objetos, esto se debe en parte a que la velocidad es muy elevada y posiblemente mejoraría al utilizar una cámara que tenga una resolución temporal mayor a la que se usó. Otra forma de mejorar estas visualizaciones podría ser utilizando no una hoja de luz sino un volumen luminoso provocado con un objetivo de microscopio como se mencionó en la subsección 1.3.
- Una característica del túnel de viento que es indispensable mejorar es el hecho de no poder variar su velocidad. Aunque esto no es complicado en comparación con la construcción completa del mismo, ya no pudo llevarse a cabo en el presente trabajo y es un obligado trabajo a futuro, necesario para poder llevar a cabo estudios de distintas índoles dentro del túnel de viento.

Bibliografía

- [1] Donald D. Baals , William R. Corliss, “Wind Tunnels of NASA”
- [2] Ali Rotondo, Amanda Sayed, “Wind Tunnels”, 2003.
- [3] S. M. Gorlin, I. I. Slezinger, “Wind tunnels and their instrumentation”, E.U.A., 1964.
- [4] Alan Pope, William H. Rae, “Low speed wind tunnel testing” Wiley, 1984.
- [5] I.E. Idel’chik, “Handbook of Hydraulic Resistance”, Moscú-Leningrado, 1960.
- [6] González Hernández Miguel A., Moreno López Ana I., Jarzabek Artur A., Perales Perales José M., Wu Yuliang y Xiaoxiao Sun, “Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel”, 2013.
- [7] Coggan Andrew R., “The Coggan Low speed wind tunnel: Design, Dimensions, and Operating Characteristics”, 2011.
- [8] Arifuzzaman, Md., Masud Mohammad, “Design, Construction and Performance Test of a Low Cost Subsonic Wind Tunnel”, Bangladesh 2012.
- [9] Prandtl L., “Attaining a Steady Stream in Wind Tunnel”, NACA TM 726, 1933.
- [10] Morel T., “Comprehensive design of axisymmetric wind tunnel contractions”, 1975, Trans. ASME, Journal of Fluids Enngineering.
- [11] Arslanian Peter J., Payam Martin, “Undergraduate research on conceptual design of a wind tunnel for instructional purposes”, 2012, American Society for Engineering Education.
- [12] Watmuff Jonathan H., “Wind Tunnel Contraction design”, 1986, Fluid Mechanics Conference Auckland.
- [13] Bell James H. y Mehta Rabindra D., “Contraction design for small low-speed wind tunnels”, E.U.A., 1988.
- [14] Goldberg Ben y Carlone Tom, “Building a wind tunnel: It will blow your mind”, 2008
- [15] Boudreau III Sherwood, “Design, construction and testing of an atmosphere boundary layer wind tunnel” E.U.A. 2009.
- [16] King Christopher David, “Computational analysis of diffuser performance for a subsonic aerodynamic research laboratory wind tunnel” E.U.A., 2012.
- [17] Hani Aziz Ameen, Rana Ali Hussien “Manufacturing and calibration af subsonic wind tunnel” 2011.

- [18] UNEP "Energy Efficiency Guide for Industry in Asia" 2006.
- [19] "Design of an axial flow fan for a vertical wind tunnel for paratroopers" Fatih Cevik, 2010.
- [20] Witt, Sohm, "Experience and knowhow for wind tunnels in testing facilities", I.G.W. Ventilatoren, 2011.
- [21] Kundu Pijush K., Cohen Ira M., Dowling David R. "Fluid Mechanics", E.U.A. 2012.
- [22] Chien-Cheng Chan, Biing-Horng Liou, Ruey-Ling Chern, "An analytical and numerical study of axisymmetric flow around spheroids", J. Fluid Mechanics, 1992.