

*Rej. 6*

# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA



**Diseño, Construcción y Experimentación de un Tunel de  
Viento Abierto de Baja Velocidad**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A N :  
JOSE GUADALUPE ALONSO ORDOÑEZ**

**SERGIO GONZALEZ AGUILAR**

**MEXICO D. F.**

**1979**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

# I N D I C E

PAG.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

1

## CAPITULO 2

### GENERALIDADES DE LOS TUNELES DE VIENTO

3

#### 2.1 Utilidad de los túneles de viento

3

#### 2.2 Clasificación de los túneles de viento

4

#### 2.3 Características básicas de los túneles de viento abiertos

7

#### 2.4 Principales desventajas

9

#### 2.5 Principales ventajas

11

## CAPITULO 3

### DISEÑO DEL TUNEL DE VIENTO

13

#### 3.1 Componentes básicos

14

#### 3.2 Especificación de las dimensiones

16

#### 3.3 Cálculo de las pérdidas por fricción

18

##### 3.3.1 Relación de energía

19

##### 3.3.2 Pérdidas

20

##### 3.3.3 Pérdidas en la zona de prueba

21

##### 3.3.4 Pérdidas en la primera etapa

22

##### 3.3.5 Pérdidas en la segunda etapa

23

##### 3.3.6 Pérdidas en la tercera etapa

24

##### 3.3.7 Pérdidas en el difusor

25

##### 3.3.8 Pérdidas en la zona del ventilador

26

##### 3.3.9 Pérdidas debidas al panel

26

##### 3.3.10 Pérdidas debidas a la entrada y salida del flujo

27

<b>CAPITULO 4</b>	<b>PAG.</b>
<b>CONSTRUCCION DEL TUNEL DE VIENTO</b>	<b>29</b>
4.1 Partes constitutivas del túnel	31
4.2 Selección del material empleado en la construcción	31
4.3 Construcción de la campana	32
4.4 Construcción de la primera etapa	33
4.5 Construcción de la segunda etapa	36
4.6 Construcción del panal	38
4.7 Construcción de la tercera etapa	40
4.8 Construcción de la zona de prueba	43
4.9 Construcción del difusor	44
4.10 Construcción del dispositivo antigiro	45
4.11 Unidad impulsora	45
<b>CAPITULO 5</b>	
<b>PRUEBAS</b>	<b>50</b>
5.1 Dispositivos de medición	50
5.2 Mediciones de la carga total	53
5.3 Mediciones de la carga estática	55
5.4 Cálculo de la velocidad	55
5.5 Cálculo de la velocidad promedio en cada una de las secciones del túnel	59
5.6 Perfil de velocidades	61
<b>CAPITULO 6</b>	
<b>RESULTADOS</b>	<b>64</b>
6.1 Resultados obtenidos en la construcción de las tres etapas del túnel de viento	64
6.2 Resultados obtenidos en la construcción de la zona de prueba y del difusor	66
6.3 Resultados obtenidos con la adaptación de la unidad impulsora	68
6.4 Consideraciones de las mediciones realizadas en la zona de prueba	68

**CAPITULO 7**

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>70</b>
7.1 Recomendaciones de diseño	70
7.2 Conclusiones relacionadas con el cálculo	71
7.3 Conclusiones relacionadas con la construcción	72
7.4 Conclusiones relacionadas con las pruebas	74
<b>REFERENCIAS</b>	<b>76</b>

## NOMENCLATURA

- A** = área
- D** = diámetro local o equivalente
- De** = diámetro externo
- Di** = diámetro interno
- Do** = diámetro del chorro de aire
- D<sub>1</sub>** = diámetro menor
- D<sub>2</sub>** = diámetro mayor
- ER** = relación de energía
- g** = gravedad
- K** = coeficiente de pérdidas
- Ko** = constante de pérdidas
- Lc** = longitud de la contracción
- $\dot{M}$**  = gasto en masa
- p o Ps** = presión estática
- Pt** = presión total
- q o Pd** = presión dinámica
- Q** = gasto volumétrico
- r** = radio hidráulico
- R** = constante del aire
- Re** = número de Reynolds
- T** = temperatura del laboratorio
- V** = velocidad media del aire

$\Delta H$  = diferencia de alturas

$\Delta H'$  = diferencia de alturas obtenidas con una inclinación  
de  $15^\circ$

$\Delta P$  = caída de la presión estática

$\lambda$  = coeficiente debido a la fricción superficial

$\gamma$  = viscosidad cinemática del aire a  $T = 20^\circ$

$\rho$  = densidad del aire

$\rho_a$  = densidad del alcohol

## CAPITULO 1

### INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como finalidad la construcción de un túnel de viento con base en condiciones de diseño prefijadas, — que facilite información experimental útil para la solución de algunos problemas relacionados con el movimiento de los fluidos.

Aunque el diseño de los túneles de viento es muy variado, dependiendo de su finalidad, no es el propósito de este trabajo profundizar en el estudio de cada uno de ellos sino únicamente en los túneles de viento abiertos de baja velocidad; los demás tipos de túneles solamente se mencionan y algunas veces se comparan con los túneles de circuito abierto para dar una idea más completa.

La construcción de este túnel de viento nos presentó — diversos problemas, los cuales influyeron de tal forma en la elaboración de esta tesis por lo que el último capítulo está dedicado a conclusiones y recomendaciones, las cuales se dan con base en la experien-

cia obtenida.

Los capítulos de que consta esta tesis tienen la siguiente secuencia:

**Introducción**

**Generalidades de los túneles de viento**

**Diseño**

**Construcción**

**Pruebas**

**Resultados**

**Conclusiones y recomendaciones**

En algunos de los capítulos se han incluido figuras y fotografías relacionadas con el túnel de viento que, esperamos, sean útiles para dar una idea concreta de las dimensiones y construcción de nuestro túnel.

## CAPITULO 2

### GENERALIDADES DE LOS TUNELES DE VIENTO

En el capítulo anterior se mencionó que el túnel de viento facilita información útil para la solución de algunos problemas relacionados con el movimiento de los fluidos, pero no se dan más detalles. Por lo anterior el presente capítulo tiene como finalidad la descripción de los túneles de viento, indicando para ello su utilidad, su clasificación y sus principales ventajas y desventajas.

#### 2.1 UTILIDAD DE LOS TUNELES DE VIENTO.

Los túneles de viento son de gran importancia para la investigación experimental en la mecánica de los fluidos, ya que por medio de ellos se puede estudiar de manera controlada los fenómenos reales que ocurren por ejemplo, en la formación y desprendimiento de la capa límite, o bien, el comportamiento del aire a diferentes velocidades, o el efecto de la fricción superficial, etc.

También se pueden simular condiciones extremas que actúen sobre algunos modelos a escala para posteriormente diseñar y construir el prototipo basándose en determinados parámetros adimensionales, entre ellos el número de Mach, el número de Reynolds, etc.

Asimismo los túneles de viento se utilizan para estudiar la propagación de las vibraciones, la visualización con humos, la resistencia al viento de estructuras, las pérdidas debidas al tamaño y forma de los objetos, la rugosidad de diferentes materiales, etc.

## 2.2 CLASIFICACION DE LOS TUNELES DE VIENTO.

Los túneles de viento se clasifican básicamente en dos tipos:

- De baja velocidad, en donde los factores predominantes son los efectos inerciales y viscosos, despreciándose la compresibilidad del aire.
- De alta velocidad, los cuales se utilizan para la investigación de flujos donde las principales fuerzas que actúan se deben a la inercia y a la compresibilidad.

Los primeros se llaman túneles de viento subsónicos ya que operan a una velocidad menor que la del sonido, mientras que los segundos se dividen en tres tipos:

- transónicos, que operan a la velocidad del sonido,

- supersónicos, que operan a una velocidad mayor que la del sonido, e
- hipersónicos, que operan a un alto grado supersónico.

Otra clasificación que se hace de los túneles de viento se relaciona con la forma de la sección transversal de la zona de prueba, la cual puede ser cuadrada, rectangular, rectangular con esquineros, octagonal, circular o elíptica.

Asimismo, algunos autores clasifican a los túneles de viento básicamente en abiertos, los cuales no tienen gufa de retorno y la energía cinética que se trasmite al aire se pierde a la salida del difusor (Fig. 2.2.1) y cerrados o túneles de viento con flujo de retorno.

Estos últimos tienen, como lo indica su nombre, una trayectoria cerrada y continúa por donde circula el aire y debido a los cambios de dirección la velocidad del aire varía (Fig. 2.2.2.).

El túnel de viento de la Fig. 2.2.2 es demasiado simple y puede advertirse que la velocidad en todos los puntos del circuito es alta y aproximadamente igual que en la sección de prueba por lo que en su longitud es mayor en relación con los túneles que tienen alguna contracción.

Si se quiere reducir su longitud, disminuir la turbulencia del flujo en la sección de prueba y mejorar la distribución de la

velocidad, es recomendable efectuar una contracción aguas arriba de la sección prueba.

Los túneles de viento de circuito cerrado pueden ser de tres tipos:

- con circuito de retorno simple
- con circuito de retorno doble
- con circuito de retorno anular

Existen además otros túneles que, aunque en menor número, son más especializados; entre ellos se puede citar los túneles de presión de retorno simple, túneles de densidad variable, túneles con refrigeración, túneles de rotación, etc.

Los túneles de presión tienen la ventaja de obtener altos números de Reynolds sin utilizar grandes modelos ni altas velocidades. Debe mencionarse que una alta presión no satisface completamente la obtención de un número de Reynolds alto, ya que la resistencia del modelo puede ser un factor decisivo a considerar.

Todos estos tipos, características, diseños y dimensiones de los túneles de viento se usan de acuerdo con las necesidades que se tengan. Algunos tienen mayor versatilidad en comparación con otros y se utilizan con enorme ventaja al ser convertibles en algunas de sus partes pudiéndose modificar, inclusive, algunos de sus parámetros como son dirección del flujo, potencia del motor, velocidad del -

aire, etc.

### 2.3 CARACTERISTICAS BASICAS DE LOS TUNELES DE VIENTO ABIERTOS.

Los túneles de circuito abierto llamados también túneles rectos continuos fueron los primeros tipos de túneles que se construyeron (Fig. 2.3.1).

Consisten de un cono de entrada, una cámara de dirección de corriente de aire, un inyector o embocadura, una sección de prueba y una unidad impulsora localizada generalmente en el difusor.- Si la sección de prueba es abierta el túnel se conoce como "Túnel - Eiffel", si la sección de prueba es cerrada el túnel se llama "Túnel NPL" (National Physical Laboratory, Inglaterra).

Los túneles de circuito abierto no tienen control alguno sobre la temperatura del aire, ya que éste lo toman directamente del medio ambiente, para tener cierto control sobre la turbulencia del flujo es necesario que posean algunos tranquilizadores o mallas, lo que incrementa el consumo de la potencia requerida hasta en un 15 por ciento. El costo de estos túneles es de aproximadamente un 50 por ciento menor que el costo de un túnel de viento cerrado equivalente.

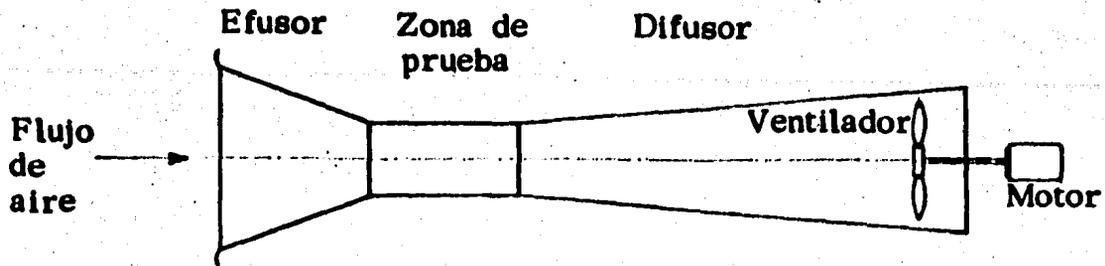


Fig. 2.2.1 Túnel de Circuito abierto

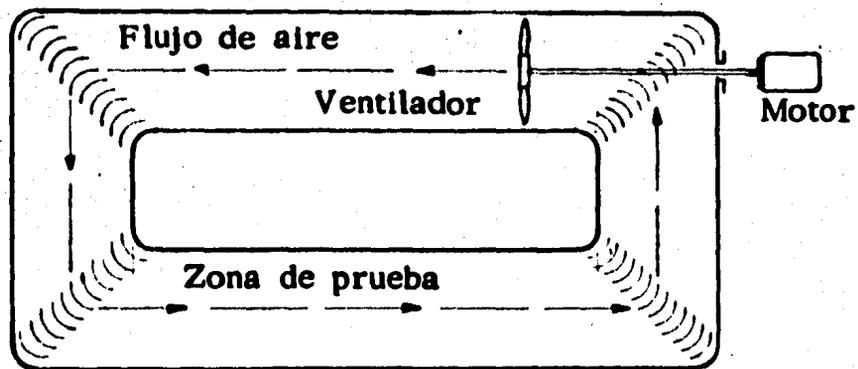


Fig. 2.2.2 La forma más simple de un Túnel de viento de circuito cerrado

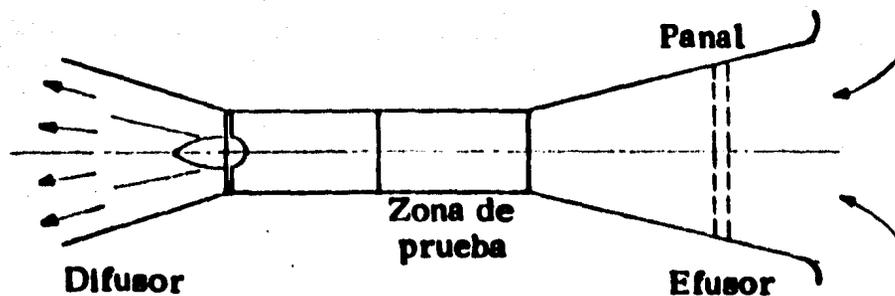


Fig. 2.3.1 Túnel de viento de circuito abierto

## 2.4 PRINCIPALES DESVENTAJAS.

- a. Están sujetos a ráfagas. Las ráfagas pueden causar variaciones en la presión dinámica y en la distribución de la misma a través de la sección de pruebas.
- b. Son ruidosos. El ruido del túnel de viento se debe principalmente al provocado por el ventilador y a las vibraciones de las paredes del túnel. Este ruido aparte de ser molesto contribuye a aumentar la turbulencia dentro del túnel.
- c. Están expuestos a los cambios de las condiciones atmosféricas. En efecto, como no se tiene control alguno sobre las propiedades del aire introducido al túnel, éstas cambian (temperatura, densidad, humedad relativa, etc.) teniéndose que considerarlas en las pruebas realizadas para poder obtener resultados representativos.
- d. No tienen control sobre la limpieza del aire. Estos túneles debido a su diseño tan simple no tienen dispositivos que permitan eliminar las partículas en suspensión con el aire, polvo, partículas de regular tamaño, por lo que se tienen que instalar ma

llas metálicas tanto a la entrada como a la salida del túnel. Se puede advertir que el polvo, aún con las mallas se introduce al túnel, sin embargo su efecto no es determinante en las pruebas a realizar y si se instalara algún accesorio que impidiera su entrada se aumentarían las pérdidas por fricción, se requeriría mayor potencia en el motor del ventilador y lógicamente el costo inicial se incrementaría.

- e. El ventilador está expuesto a sufrir daños. Generalmente este tipo de túneles de viento no cuenta con algún sistema de protección en lo que al ventilador se refiere, es decir no disponen de alguna malla de protección, o bien, el ventilador no está localizado en algún retorno del túnel como es el caso de los túneles de circuito cerrado, si ocurre el desprendimiento de algún modelo, éste dañaría a las aspas del ventilador, por lo que se recomienda que el ventilador no sea de una sola pieza, es decir fundido, sino que éste constituido por varias aspas soldadas, de este modo en caso de ocurrir algún daño en ellas, solamente se cambiaría el aspa dañada. Es poco probable que ocurra lo anterior

en túneles de baja velocidad.

## 2.5 PRINCIPALES VENTAJAS.

En la época moderna es muy necesario hacer una evaluación de las ventajas y desventajas de cualquier proyecto a considerar ya que de esta manera pueden optimizarse los recursos humanos, económicos y el factor tiempo, que son de vital importancia para la aceptación o rechazo de todo proyecto.

- a. Economía. Debido a que este tipo de túneles requieren de menos componentes que un túnel de circuito cerrado resultan más económicos, siendo ésta una de las principales razones por la cual los centros de educación superior apoyan su construcción o adquisición. Por otra parte el ahorro de instrumentos de medición que se tiene en este tipo de túneles en comparación con los túneles de viento de circuito cerrado es muy relativo, ya que esto depende de la precisión que se quiera obtener en las mediciones, de los parámetros y de las variables a medir. Por lo anterior no se puede decir que un túnel de circuito abierto es más económico que un túnel de circuito cerrado en cuanto a instrumentación se re-

fiere.

- b. **Construcción rápida.** Dadas las dimensiones de estos túneles y la sencillez de su diseño se han podido construir en un tiempo aproximado de 100 horas-hombre (Ref. 3).
- c. **Fácil instalación.** Generalmente casi todos los aparatos pesados y con motor requieren una cimentación especial para evitar la transmisión de las vibraciones y la posibilidad de formación de grietas en el piso. Lo anterior no ocurre en los pequeños túneles de viento debido a su poco peso facilitándose en esta forma su instalación. Por otra parte, las vibraciones que se producen, debidas al motor del túnel se pueden eliminar satisfactoriamente con un buen diseño de la estructura que los soporta.
- d. **Tamaño práctico.** Gracias a su pequeño tamaño no requieren una gran área por lo que generalmente se localizan dentro de los laboratorios ya existentes, de otra forma se tendría que construir un edificio especial para su funcionamiento.

## CAPITULO 3

### DISEÑO DEL TUNEL DE VIENTO

El propósito del diseño del túnel de viento es establecer, mediante el cálculo y el dibujo, las características específicas que deberá tener el dispositivo para lograr durante su operación las condiciones del flujo previstas.

En nuestro caso las condiciones que se quieren obtener del flujo en la sección de prueba son:

- un flujo lo más laminar posible
- una velocidad media relativamente baja (aprox. 10 m/s).

Un flujo con las características anteriores permite estudiar los efectos de la formación y desprendimiento de la capa límite, la turbulencia, algunos parámetros adimensionales; también se pueden lograr condiciones apropiadas para medir y visualizar en modelos que permitan obtener resultados en prototipos teniendo en cuenta la seme-

janza dinámica.

### 3.1 COMPONENTES BASICOS.

Los túneles de viento se diseñan de acuerdo con las funciones específicas que van a desarrollar, por tal motivo se tiene una gran diversidad en los componentes de los mismos; sin embargo todos tienen cuatro componentes esenciales:

- Efusor
- Sección de prueba
- Difusor
- Unidad impulsora

#### Efusor

El efusor está colocado antes de que el flujo de aire entre a la sección de prueba (aguas arriba). Es aquí donde el fluido se acelera partiendo del reposo o aproximadamente del reposo, lográndose obtener al final del mismo las condiciones requeridas en la sección de prueba.

#### Sección de prueba

En esta sección se llevan a cabo las observaciones ne-cesarias de un fenómeno en estudio. Es aquí donde también se coloca el modelo de alguna estructura o dispositivo.

La sección de prueba puede estar limitada por paredes rígidas, en cuyo caso el túnel se llama "túnel de garganta cerrada", o por aire de diferente velocidad (generalmente en reposo), en este caso se trata de un "túnel de chorro abierto".

### Difusor

La función del difusor es reconvertir la energía cinética del chorro de aire que sale de la sección de prueba, en energía de presión tan eficientemente como sea posible.

### Unidad impulsora

Para poder tener un flujo de aire controlado es necesario emplear algún dispositivo que nos proporcione el flujo requerido. Tal dispositivo puede ser un ventilador acoplado a un motor que puede ser monofásico o trifásico; al conjunto de motor y ventilador se le llama unidad impulsora.

El ventilador puede tener, generalmente, de cuatro a ocho aspas y ser de una sola pieza, es decir fundido, o puede estar formado por varias aspas soldadas a un círculo metálico cuyo acoplamiento se realiza con el motor por medio de una flecha. Dependiendo de la finalidad del túnel y las dimensiones del mismo tanto el motor como el ventilador tendrán especificaciones muy concretas de tamaño, potencia y variación de la velocidad.

Respecto a la ubicación de la unidad impulsora dentro del túnel de viento, generalmente se acostumbra instalarla aguas abajo de la zona de prueba, concretamente, al final del difusor en los túneles de circuito abierto o entre la segunda y tercera esquina de un túnel de circuito cerrado.

El motor puede estar acoplado directamente al ventilador y quedar dentro del túnel o acoplado por medio de bandas y montado fuera del túnel; esto último es recomendable para motores de alta potencia o cuando las condiciones de estancamiento del fluido de trabajo difieran considerablemente de las de la atmósfera o cuando se quieran eliminar los problemas del calentamiento del flujo debidos al motor.

Para controlar la velocidad del flujo de aire dentro del túnel lo más común es variar la velocidad de rotación del ventilador por medio de una relación de poleas, variar el ángulo de los aspas del ventilador o ir variando el voltaje aplicado a la armadura del motor por medio de una resistencia variable (reóstato).

### 3.2 ESPECIFICACION DE LAS DIMENSIONES

Las dimensiones de cada una de las etapas del túnel de viento generalmente se seleccionan tomando en cuenta las especificaciones de túneles ya construidos.

Relación de contracción. Así se denomina a la relación que existe - entre el área de entrada del túnel y el área transversal de la sección de prueba. La relación de contracción tiene como finalidad disminuir la turbulencia del flujo de aire dentro del túnel; por lo que mientras más grande es esta relación más disminuye el nivel de turbulencia -- del flujo y se mejora la distribución de la velocidad.

Son usuales las relaciones de contracción de 4 a 1 hasta 9.8 a 1 dependiendo de la velocidad requerida en la zona de prueba (ref. 1). En nuestro diseño se tiene una relación de 5.76 a 1 la cual se obtuvo con una área de entrada de  $1.44 \text{ m}^2$  (primera etapa) y una área transversal, en la zona de prueba, de  $0.25 \text{ m}^2$ .

Determinada la relación de contracción las dimensiones de las primeras tres etapas dependen principalmente de los ángulos - de convergencia entre sus paredes. Si el ángulo de convergencia es - muy pequeño se presentan cambios ligeros entre las uniones de cada - una de las etapas resultando el túnel demasiado largo, el caso contra - rio se presenta cuando el ángulo de convergencia es muy grande, re - percutiendo en la formación de remolinos convirtiendo el flujo en tur - bulento.

Teniendo en cuenta la velocidad, el área transversal y - el gasto volumétrico en la zona de prueba y, además, conociendo la - relación de contracción es posible definir los ángulos de convergencia

y la longitud de cada una de las etapas.

Las dimensiones del difusor se eligieron considerando lo anterior aunque con la particularidad de que el ángulo de divergencia no debe ser mayor de  $7^\circ$  (ref. 1 y 2). Por consideraciones de recomendación, teniendo en cuenta las restricciones debidas al área transversal de la zona de prueba y el diámetro del ventilador elegido se adoptó, finalmente, un ángulo de  $7^\circ$ .

### 3.3 CALCULO DE PERDIDAS POR FRICCION.

Suponiendo que el aire es un fluido incompresible y que su flujo dentro del túnel es permanente y sin pérdidas podemos utilizar la ecuación de Bernoulli (ref. 4)

$$p + 1/2 \rho v^2 = \text{constante} \quad (3.1)$$

donde  $p$  es la presión estática,  $\rho$  la densidad del fluido y  $V$  la velocidad media del flujo. Bajo las mismas condiciones podemos utilizar también la ecuación de continuidad (ref. 4)

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (3.2)$$

donde  $A$  y  $V$  representan el área y la velocidad media en la sección, respectivamente los subíndices indican el estado inicial y final donde se aplicó la ecuación anterior. La ecuación de Bernoulli supone que no existen pérdidas, sin embargo éstas se presentan y se traducen en

una caída de presión estática originada por la fricción.

Es común expresar las pérdidas de determinada sección mediante un coeficiente definido por

$$K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho \frac{A}{AV^2}} = \frac{\Delta p}{q} \quad (3.3)$$

donde  $\Delta p$  es la caída de la presión estática y  $q$  es la presión dinámica.

A lo largo del túnel de viento ocurren pérdidas que aparecen como sucesivas caídas de presión estática que son balanceadas por el aumento de la presión estática debida al ventilador. La caída de la presión total debe conocerse para poder diseñar el ventilador.

### 3.3.1 RELACION DE ENERGIA.

Es la relación de energía del chorro de aire a la energía de entrada y representa una medida de la eficiencia de un túnel. Es siempre mayor que la unidad, indicando que la cantidad de energía almacenada en el chorro de aire es capaz de efectuar trabajo en alta proporción antes de ser inducido al reposo. Aún no se llega a un acuerdo acerca de esta definición, existiendo varias de ellas, pero la que en el cálculo se va a adoptar es la siguiente:

$$\text{relación de energía} = \frac{\text{potencia del chorro de aire}}{\sum \text{pérdidas en el circuito del túnel}}$$

$$\text{relación de energía} = \frac{1/2 \rho AV^3}{k 1/2 \rho AV^3} = ER$$

donde A es área y V velocidad en la zona de prueba respectivamente.

$$ER = \frac{1}{\sum_{i=1}^n K_i} \quad (3.4)$$

La relación anterior excluye tanto la eficiencia del motor como la del ventilador.

### 3.3.2 PERDIDAS

En cada una de las secciones del túnel ocurren pérdidas de energía que, generalmente, se describen como una caída de la presión estática  $\Delta p$  mediante un coeficiente de pérdidas  $K = \Delta p/q$ .

Para secciones cilíndricas la caída de presión en una longitud L está dada por  $p/L = (\lambda/D) (\rho/2)V^2$ , y  $K = \Delta p/q = \lambda(L/D)$  (ref. 1) por lo tanto

$$K = \lambda(L/D) (D_o^4/D^4) \quad (3.5)$$

donde

$K$  = coeficiente de pérdidas

$D$  = diámetro local o equivalente de la sección

$D_o$  = diámetro del chorro de aire

$\lambda$  = coeficiente debido a la fricción superficial

Cuando las secciones no son cilíndricas lo que se hace es encontrar el diámetro equivalente de la sección donde se requieren calcular las pérdidas.

### 3.3.3 PERDIDAS EN LA ZONA DE PRUEBA.

Como la zona de prueba tiene una área transversal cuadrada (Fig. 4.1) es necesario calcular primeramente su diámetro equivalente (ref. 4)

$$D = 4r$$

donde  $r$  está definido por el cociente del área sobre el perímetro mojado; finalmente tenemos

$$D = 4 (\text{área/perímetro mojado}) = \frac{4(0.5)^2}{4(0.5)}$$

$$D = 0.5 \text{ m}$$

Para calcular el coeficiente debido a la fricción superficial ( $\lambda$ ) es necesario establecer el número de Reynolds ( $Re$ ) (ref. 1) definido por

$$Re = \frac{DV}{\gamma} \quad (3.6)$$

donde  $\gamma$  es la viscosidad cinemática del aire (ref. 1)

$$\gamma_{20^\circ\text{C}} = 0.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

Sustituyendo el valor  $D$ , el de la viscosidad cinemática en la ecuación (3.6) y suponiendo una velocidad en la zona de prueba-

de 10 m/s se tiene

$$R_e = \frac{0.5 (10)}{0.15 \times 10^{-4}} = 333,334$$

Con el valor del número de Reynolds obtenido se estima gráficamente el coeficiente (ref. 1 Pág. 70)

$$\lambda = 0.0128$$

La longitud de la zona de prueba, (Fig. 4.1) es 1.5 m con lo cual podemos finalmente sustituir los valores anteriores en la ecuación (3.5)

$$K = 0.0128 (1.5/0.5) \frac{(0.5)^4}{(0.5)^4} = 0.0384$$

### 3.3.4 PERDIDAS EN LA PRIMERA ETAPA.

Debido a las dimensiones tan grandes del efusor se tuvo que construir por partes. Consta de tres etapas llamadas:

- Etapa inicial o primera etapa
- Segunda etapa
- Tercera etapa

Calcularemos en esta sección las pérdidas correspondientes a la primera etapa, la cual induce el flujo de aire a pasar por el túnel desde una velocidad aproximadamente nula hasta una velocidad calculada de 1.736 m/s (ver secc. 5.5 y 5.6).

En la primera etapa se presenta una caída de presión - debida principalmente a la fricción superficial. El coeficiente de pérdidas está definido por la siguiente expresión (ref. 1)

$$K = 0.32 \lambda L_c / D^5 \quad (3.7)$$

donde  $L_c$  es longitud de la contracción, m.

La longitud de la contracción (Fig. 4.1) es 1.5 m; sustituyendo valores se obtiene

$$K = 0.0128 (0.32) (1.5/0.5)$$

$$K = 0.01228$$

Las pérdidas en las contracciones son, generalmente, - menores del 3 por ciento de las pérdidas totales del túnel por lo que - algún error en su cálculo es de poca importancia.

### 3.3.5 PERDIDAS EN LA SEGUNDA ETAPA.

El cálculo de las pérdidas en esta etapa es idéntico - al efectuado en la sección 3.3.3; lo que se requiere es calcular el -- diámetro equivalente

$$D = 4(0.86)^2 / (4 \times 0.86) = 0.86 \text{ m}$$

Para calcular la velocidad del flujo de aire en esta etapa es necesario estimar el gasto volumétrico, el cual a su vez se determina suponiendo la velocidad del flujo en la zona de prueba y conociendo el área transversal de la misma.

Sustituyendo valores en la ecuación (3.2) se tiene

$$Q = 0.25(10) = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Como el gasto volumétrico es constante y, además, se conoce el área transversal de la segunda etapa es posible calcular la velocidad en esta segunda etapa.

$$V = Q/A_2$$

donde  $A_2$  es el área transversal de la segunda etapa (Fig. 4.1)

$$V = 2.5/0.7396 = 3.3802 \text{ m/s}$$

El número de Reynolds para esta sección es

$$R_e = 0.86(3.3802)/(0.15 \times 10^{-4})$$

$$R_e = 193798$$

Con el valor anterior se determina el coeficiente  $\lambda$  gráficamente (ref. 1)

$$\lambda = 0.0130$$

Sustituyendo en la ecuación (3.5) tenemos

$$K = 0.013(1/0.86) (0.50)^4 / (0.86)^4$$

$$K = 0.001727$$

### 3.3.6 PERDIDAS EN LA TERCERA ETAPA

El procedimiento seguido en este cálculo es igual al realizado en la sección 3.3.4 por lo que utilizamos nuevamente la ecuación (3.7)

$$\lambda = 0.013$$

$$L = 1 \text{ m (Fig. 4.1)}$$

$$D = 0.5 \text{ m}$$

$$K = 0.32 (0.013) (1/0.5)$$

$$K = 0.00832$$

### 3.3.7 PERDIDAS EN EL DIFUSOR.

Las pérdidas en esta zona son mayores que las obtenidas en las zonas anteriores debido a que no solo ocurren pérdidas por fricción sino que además existen pérdidas debidas a la expansión que el difusor presenta.

El coeficiente de pérdidas está dado por la siguiente ecuación (ref. 1)

$$K = (\lambda / (8 \tan \alpha / 2) + 0.6 \tan \alpha / 2) (1 - D_1^4 / D_2^4) D_0^4 / D_1^4 \quad (3.8)$$

donde  $\alpha$  es el ángulo de divergencia entre las paredes opuestas (no mayor de  $7^\circ$ ),  $D_1$  el diámetro menor y  $D_2$  el diámetro mayor;  $\lambda$  es el mismo al utilizado anteriormente

$$K = (0.013 / (8 \tan 3.5) + 0.6 \tan 3.5) (1 - 0.5^4 / 0.6223^4) (0.5^4)$$

$$K = 0.03689$$

En el cálculo anterior se utilizó un ángulo de  $7^\circ$  (Fig. 5.6)

### 3.3.8 PERDIDAS EN LA ZONA DEL VENTILADOR.

Como esta zona es cilíndrica empleamos la ecuación (3.5) que es para este tipo de sección, y como los diámetros son iguales, la ecuación se reduce a

$$K = \lambda (L/D)$$

donde  $L = 0.5$  m y  $D = 0.6223$  m

$$K = 0.013(0.5/0.6223)$$

$$K = 0.01044$$

### 3.3.9 PERDIDAS DEBIDAS AL PANAL

No solo existen pérdidas debidas a la fricción superficial del aire en las caras internas de las paredes o por los cambios de forma de las secciones que lo forman sino también se tienen pérdidas ocasionadas por el panal.

Los panales (honeycombs) tienen como función uniformizar el flujo de aire para obtener, en la zona de prueba, las características deseadas. Generalmente tienen una longitud de 5 a 10 veces su diámetro (ref. 1); su forma es, principalmente, cilíndrica, cuadrada y hexagonal. En este caso, en particular, el panal es cilíndrico y tiene una constante de pérdidas  $K_0 = 0.3$  (ref. 1). El coeficiente de pérdidas dado por

$$K = K_0 D_0^4/D^4$$

donde  $D_0$  es el diámetro del chorro de aire y  $D$  es el diámetro local del Túnel

$$K = 0.3(0.5)^4 / (0.86)^4$$

$$K = 0.0342$$

### 3.3.10 PERDIDAS DEBIDAS A LA ENTRADA Y SALIDA DEL FLUJO

Además de las pérdidas antes mencionadas se tienen - pérdidas debidas a la entrada y a la salida del flujo de aire en el túnel. Estas pérdidas se obtuvieron gráficamente (ref. 6) y son las siguientes

$$K = 0.2 \text{ a la entrada del túnel}$$

$$K = 0.5 \text{ a la salida del mismo}$$

#### TABLA DE LAS PERDIDAS ESTIMADAS EN EL TUNEL DE VIENTO

Sección	K	% de pérdidas
Zona de prueba	0.0384	4.4768
Primera etapa	0.01228	1.4316
Segunda etapa	0.01727	2.0134
Tercera etapa	0.00832	0.9699
Difusor	0.03689	4.3000
Zona del ventilador	0.01044	1.2171
Panal	0.0342	3.9871
Entrada	0.2	23.3168
Salida	0.5	58.2920
	<u>0.85775</u>	<u>100.00</u>

$$\text{Relación de energía } ER = \frac{1}{\sum_{i=1}^n K_i} = \frac{1}{0.85775}$$

$$ER = 1.16584$$

La potencia necesaria para vencer las pérdidas está dada por (ref. 1 y Ref. 2)

$$\text{Pot} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \rho A V^3}{2 \eta} \quad (3.9)$$

donde es  $\rho$  la densidad del aire,  $A$  es el área de la zona de prueba,  $V$  la velocidad del flujo en la zona prueba y  $\eta$  la eficiencia del motor.

Suponiendo una eficiencia del 70% y sustituyendo valores en la ecuación (3.9), (Fig. 4.1 y Fig. 5.6)

$$\text{Pot} = \frac{0.85775(0.9143)(0.75)(1000)}{2(0.70)} = 420.129 \text{ W}$$

$$\text{Pot} = 420.129(1.34 \times 10^{-3}) = 0.5633 \text{ HP.}$$

## CAPITULO 4

### CONSTRUCCION DEL TUNEL DE VIENTO

Si tuvieramos que hacer alguna descripción muy general de la forma que tiene el túnel de viento diríamos que es un ducto metálico cuadrado en posición horizontal compuesto por varias secciones cuya área transversal va disminuyendo hasta llegar a una sección de acrílico de área uniforme, donde al final de ella se empieza a incrementar el área, y al mismo tiempo cambia la forma de cuadrada o redonda, para terminar acoplada a una última sección cilíndrica donde se localiza el ventilador.

Es la finalidad de este capítulo presentar las secciones que componen el túnel, dando para ello el nombre de cada una de ellas, mencionar las características que se eligieron para la selección de los materiales empleados, dar las dimensiones de las partes que constituyen a cada una de las secciones y, finalmente, especificar los detalles más importantes para su construcción.

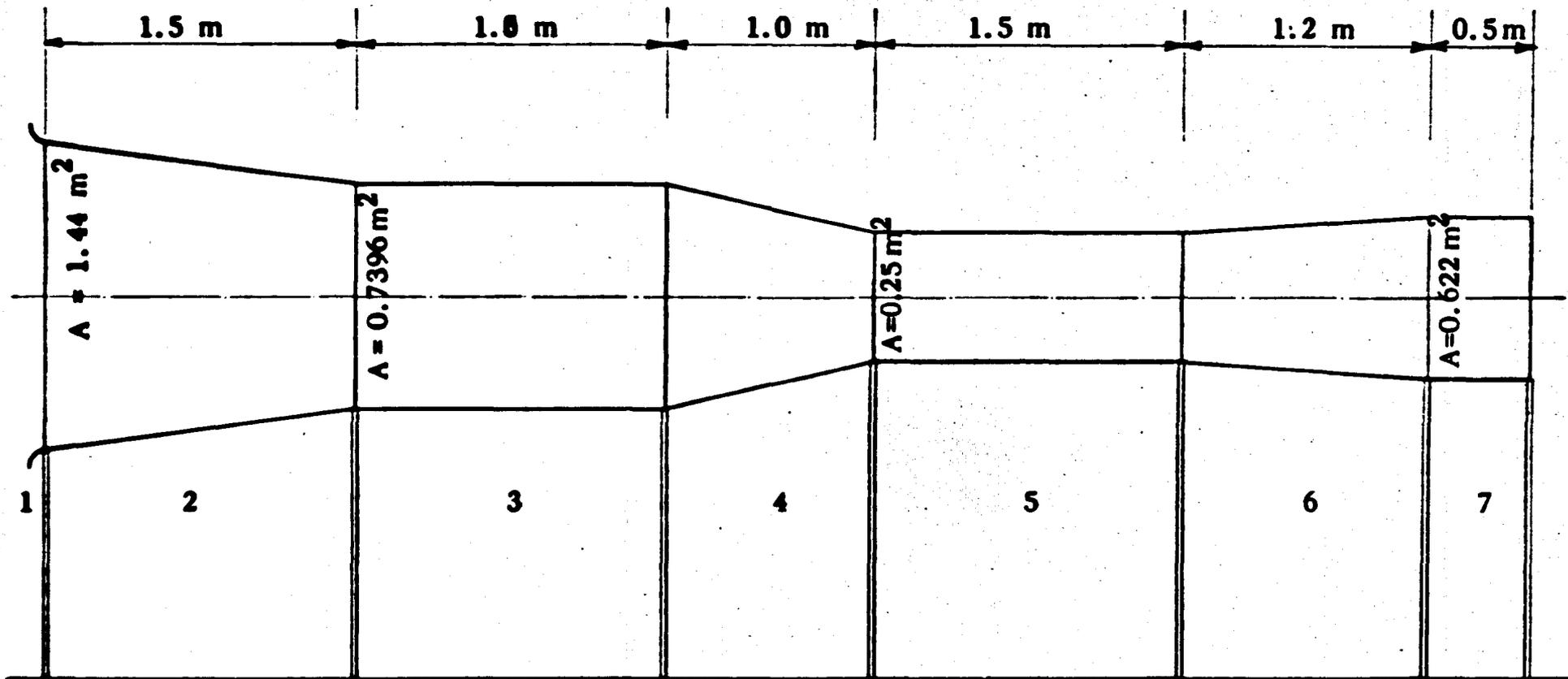


Fig. 4.1 Partes constitutivas del Túnel

#### 4.1 PARTES CONSTITUTIVAS DEL TUNEL

Las partes que constituyen el túnel son (Fig. 4.1)

1. campana
2. primera etapa
3. segunda etapa
4. tercera etapa
5. zona de prueba
6. difusor
7. unidad impulsora

Donde las etapas de los números 2, 3 y 4 forman lo que se llama -  
EFUSOR.

La distribución, nombre y dimensiones de todas las etapas que forman el túnel de viento se muestran en la figura 4.1.

#### 4.2 SELECCION DEL MATERIAL EMPLEADO EN LA CONSTRUCCION

Para la construcción del túnel de viento se propusieron-  
varios materiales; entre ellos lámina, madera, triplay, fibra de vi- -  
drio, acrílico, etc. De los cuales se eligieron lámina, acrílico - mada  
dera, y fibra de vidrio para la construcción de las primeras tres etapas,  
la zona de prueba y difusor respectivamente, de acuerdo con los  
siguientes criterios.

- unir por partes
- bajo costo
- facilidad en la construcción
- funcionalidad
- maniobrabilidad

Los materiales que se emplearon en la construcción del túnel son fáciles de conseguir y de trabajar, por lo que creemos que son los adecuados, aunque quizá no los únicos.

#### 4.3 CONSTRUCCION DE LA CAMPANA

Con este nombre se designa a la sección curva localizada al inicio del túnel de viento (ver Fig. 4.1), en esta sección el fluido se acelera desde una velocidad teóricamente cero hasta una velocidad aproximada de 1.736 m/s (secc. 5.6).

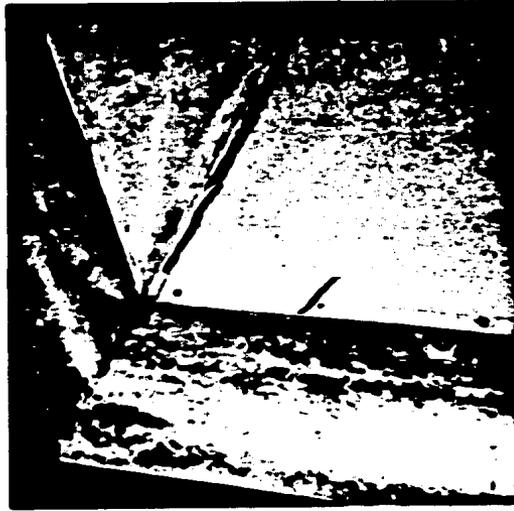
En la construcción de la campana se empleó lámina calibre 22 para que se facilitara hacer la curvatura, dobleces y ajustes necesarios. Debido al espesor tan delgado se tuvieron que hacer traslapes de dos láminas por cada lado de la campana, la cual tiene cuatro lados. Los traslapes se unieron por medio de una punteadora obteniéndose una buena rigidez en los cuatro lados de la campana. Las uniones de la campana fueron hechas con remaches pop y cubiertas con resanador para obtener un acabado superficial aceptable, (Fo-

tografías 4.3.1, 4.3.2 y 4.3.3).

#### 4.4 CONSTRUCCION DE LA PRIMERA ETAPA

El material empleado para la construcción de las primeras tres etapas es lámina negra calibre 18. El costo de este tipo de lámina es bajo y su espesor permite realizar fácilmente las uniones requeridas. Se menciona lo anterior ya que fue necesario avellanar internamente la lámina para poder ocultar los remaches lo cual se logró gracias al espesor de la lámina.

Debido a las dimensiones y forma de esta etapa se tuvo que construir por partes. Consta de cuatro caras o secciones de las siguientes dimensiones, (Fig. 4.4.1).



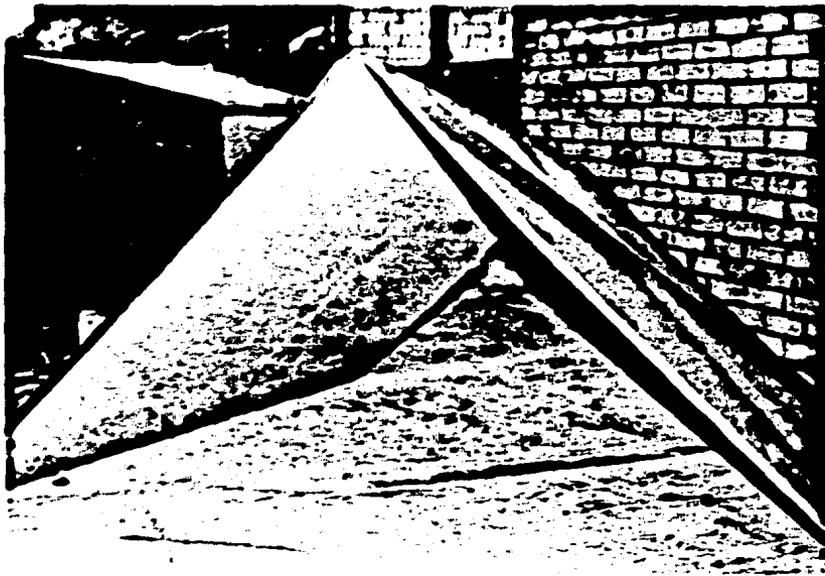
**Fotografía 4.3.1 Unión de dos lados de la campana aún sin resanar**



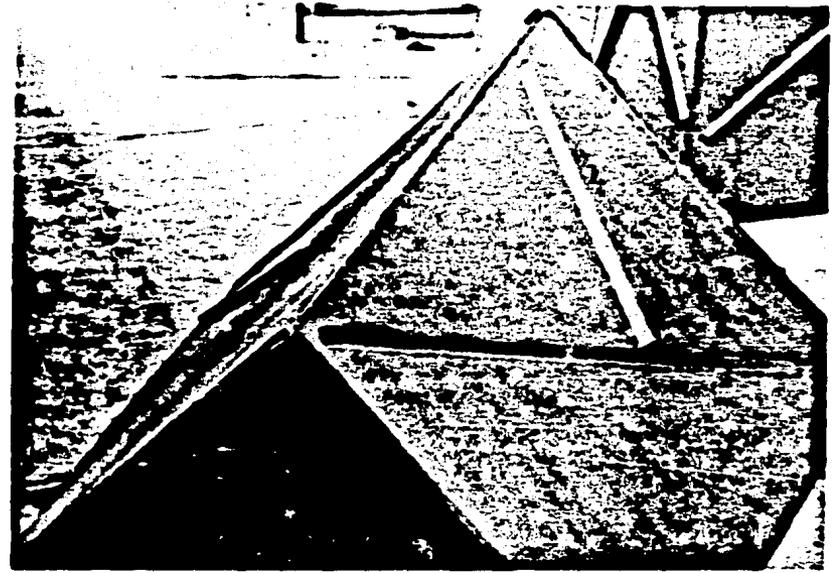
**Fotografía 4.3.2 Unión de dos lados de la campana ya resanados**



**Fotografía 4.3.3 Aspecto de uno de los lados de la campana**

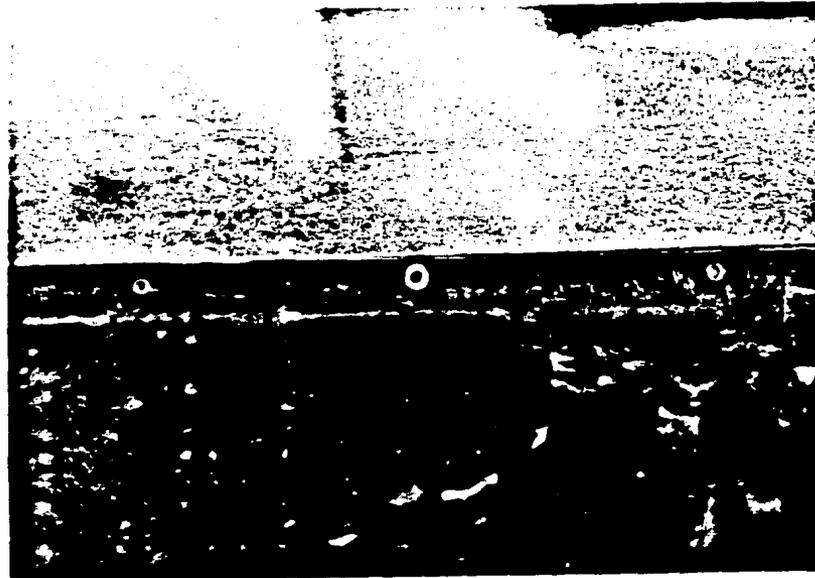


Unión de dos de las caras de la primera etapa



Disposición del perfil punteado exteriormente

Figs. 4.4.1.



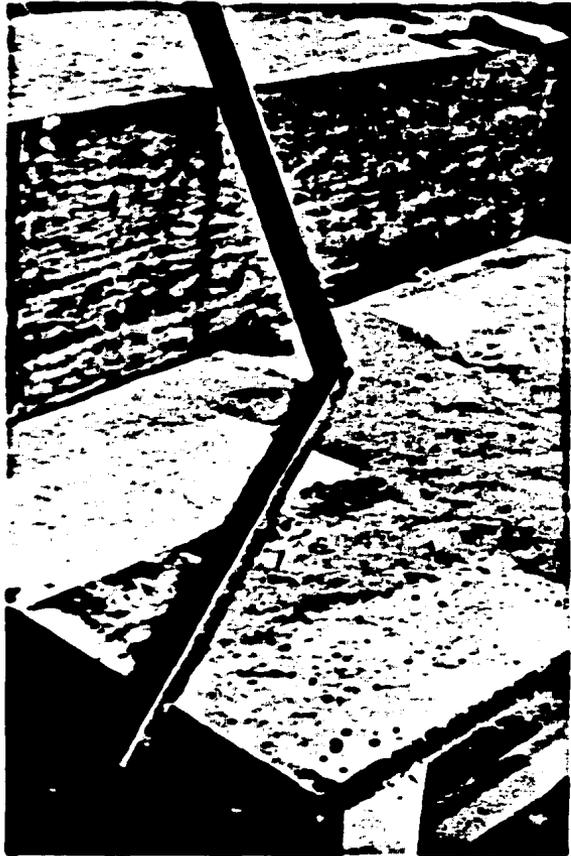
Detalle de la unión  
efectuado con remaches  
en las "cejas" de las  
secciones metálicas

En la Fig. 4.4.1 se notan unas "cejas", estas se hicieron a  $45^\circ$  para poder hacer las uniones, de las caras, exteriormente por medio de remaches pop de  $1/8''$  x  $1/4''$ .

Debido al gran tamaño de esta etapa, la lámina se pandea a pesar de su espesor, por lo que fue necesario puntearle exteriormente un perfil en forma de costilla en diagonal a cada una de las caras. Terminada la etapa se unió la campana, utilizando para ello 10 remaches en cada uno de los cuatro lados. La unión de la campana con la primera etapa dió cierta rigidez al túnel la cual aumentó al colocarle exteriormente un perfil a manera de cinturón.

#### 4.5 CONSTRUCCION DE LA SEGUNDA ETAPA

Esta etapa es de menor tamaño que la primera, lo que hizo posible que se construyera con solo dos secciones a  $90^\circ$  evitándose el trabajo de remachar y rellenar con relleno plástico dos lados más. En este caso también fue necesario puntear el perfil antes mencionado en las diagonales principales de las dos secciones que componen esta etapa.



**Perfil utilizado a manera de "cinturón"  
para efectuar las uniones externas de  
las primeras tres etapas**



**Detalle del perfil ya unido**

#### 4.6 CONSTRUCCION DEL PANAL.

En la segunda etapa del túnel y de acuerdo a recomendaciones (ref. 1 y ref. 2) se localiza el panal.

Para su construcción se eligieron algunas características que debe de cumplir, entre ellas debemos mencionar que no transmitiera vibraciones, que no se oxidara, que fuera fácil su construcción y su instalación.

Para satisfacer algunas de estas condiciones se construyó un modelo del panal en lámina galvanizada calibre 22.

Este modelo fue de gran utilidad ya que se pudo apreciar que el peso del panal es excesivo dadas sus dimensiones, se requerían demasiadas láminas implicando un costo elevado, las uniones solo se pueden hacer con estaño y además éstas generan turbulencias. Por las razones anteriores se pensó en construirlo de otro material.

Entre los materiales propuestos estaban:

- tubos de acrílico
- tubos de aluminio
- tubos de latón
- tubos de plástico
- tubos de pvc

De los materiales anteriores se escogió el pvc (poli - - cloruro de vinilo) debido a sus ventajas sobre los demás:

- es liviano
- es fácil de maquinar
- no se tiene que soldar
- no se oxida
- es fácil de instalar
- no transmite demasiado ruido y vibraciones
- su costo no es elevado
- no requiere de mantenimiento periódico, etc.

Una vez seleccionado el material (tubos de pvc) y conociendo la longitud de los panales, que generalmente varía de 5 a 10 veces su diámetro (ref. 1), se adquirieron 60 tubos de pvc de 3 m de longitud y 3/4" de diámetro. De estos se hicieron cortes de 15 cm de cada uno obteniéndose un total de 1024 "tubitos" que son los necesarios para cubrir el área transversal de la segunda etapa (0.86 m x 0.86 m).

Debido a la finalidad del panel, éste no debe tener irregularidades en los extremos debidas al corte por lo que cada uno de los "tubitos" fue maquinado en un torno, obteniéndose un acabado adecuado en los bordes donde se efectuó el corte.

Terminada la operación anterior se procedió a pegar los 1024 "tubitos" con un adhesivo especial para pvc, el cual se aplicó

en los extremos de los "tubitos" y en su parte media con el fin de obtener mayor rigidez y fácil manejo de los mismos.

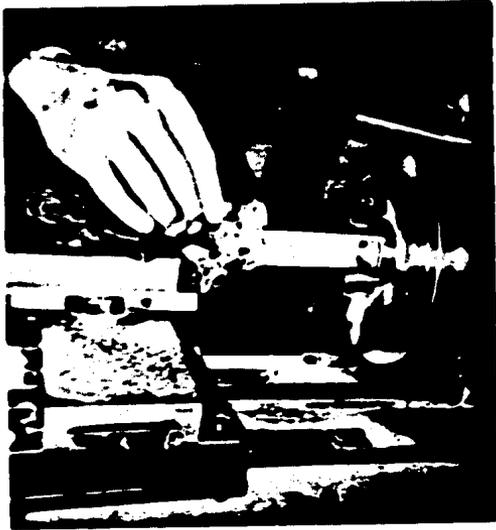
El panel se hizo de varios modulos (paquetes formados de 5 x 5) lo que facilita su instalación, teniéndose a la vez un ahorro de tiempo cuando se necesite o se requiera quitarlo.

La instalación del panel dentro del túnel no presentó -- problemas debido a las características mencionadas anteriormente. No requirió el empleo de algún adhesivo para su fijación con las paredes internas de la segunda etapa ya que se colocó a presión únicamente.

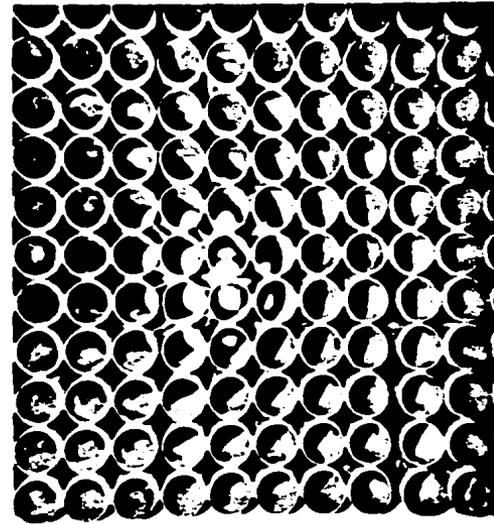
#### 4.7 CONSTRUCCION DE LA TERCERA ETAPA

La construcción de esta etapa es similar a la construcción de la primera etapa por lo que se cumple también lo mencionado en la sección 4.4 solamente que debido a su menor tamaño no fue necesario emplear las "costillas" mencionadas anteriormente.

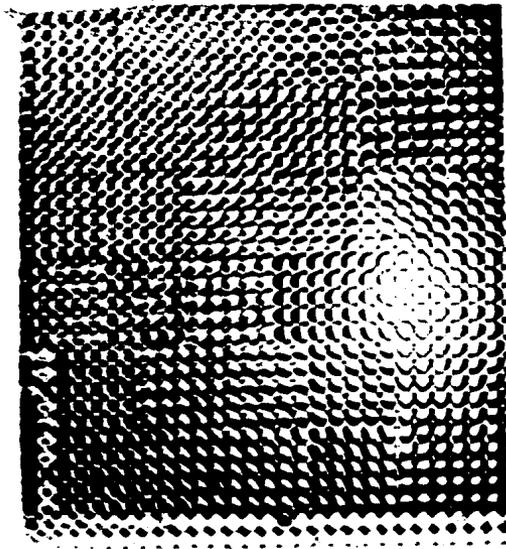
Esta etapa es la última sección que forma el efusor, - siendo aquí donde el flujo de aire se acelera a la velocidad requerida en la zona de prueba lo que se consigue por medio de la reducción -- del área de salida de esta etapa efectuándose así la relación de contracción fijada por el diseño. Las dimensiones de una de las caras o secciones que forman a la tercera etapa se muestran en las fotos 4.6.1.



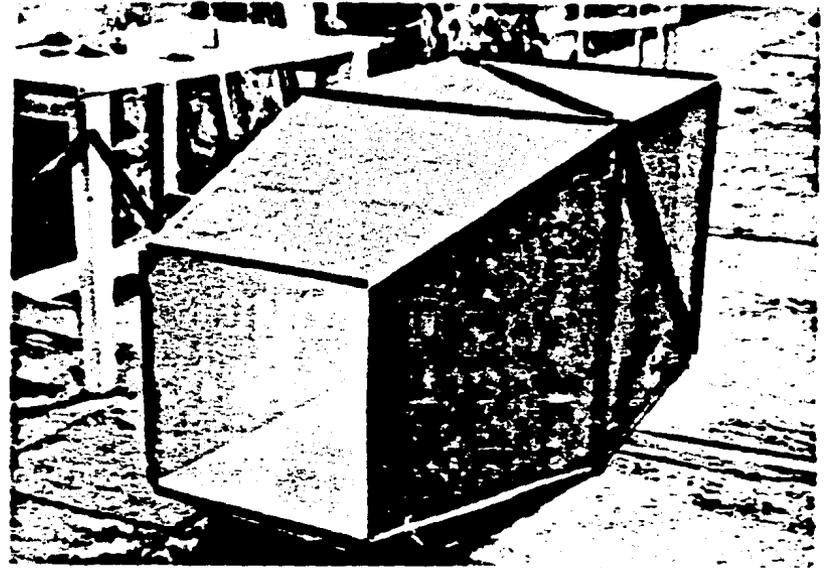
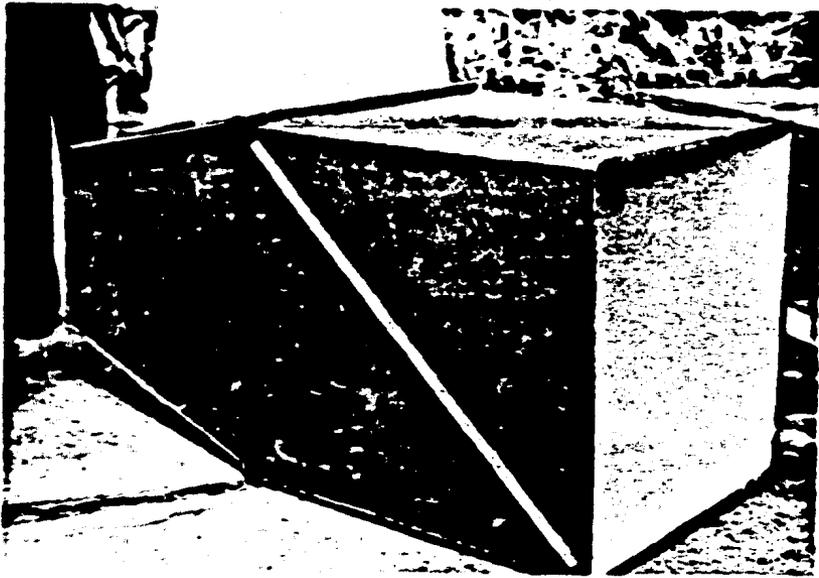
**Forma en que se efectuó el corte,  
en el torno, de cada uno de los  
tubitos**



**Unión de algunos módulos de  
tubitos.**

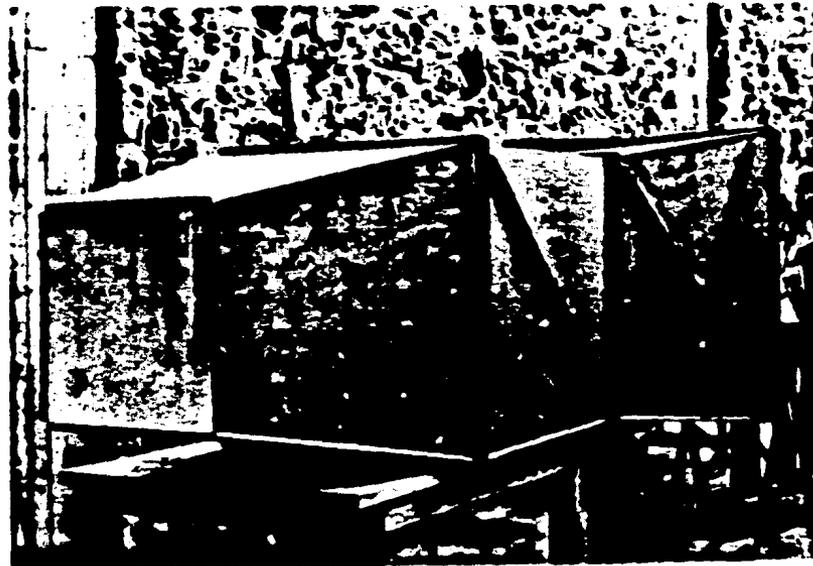


**Aspecto del panel ya  
instalado en el interior  
de la segunda etapa**



**Detalle de la segunda y tercera etapas**

**Fotografías 4.6.1.**



**Primeras tres etapas o efusor.  
La primera etapa es la del lado derecho**

#### 4.8 CONSTRUCCION DE LA ZONA DE PRUEBA

Debido a la finalidad de la zona de prueba ésta debe permitir la visualización de los efectos de las pruebas realizadas en ella. Por tal motivo los materiales más adecuados para su construcción son vidrio y acrílico.

De los materiales anteriores se eligió el acrílico debido, principalmente, a que presenta algunas ventajas sobre el vidrio, entre ellas mencionaremos que no es frágil, es fácil de cortar y perforar y se ajusta bien en las uniones debido a su elasticidad.

Por otra parte la longitud de la zona de prueba es de tres veces su diámetro (ref. 2). Consta de cuatro secciones, de longitud 1.5 m y ancho 0.5 m, totalmente desmontable e independientes entre sí. Las dos secciones laterales son de acrílico de 8 mm de espesor; las otras dos son de madera de 2 cm de espesor.

Las secciones de la zona de prueba tienen en los extremos un perfil a manera de marco que permite efectuar su unión.

Las uniones de las cuatro secciones están hechas con tornillos de diámetro  $7/32''$  y  $5/16''$  y una longitud de  $1\ 1/2''$  y  $1''$  respectivamente.

Es muy importante que la zona de prueba esté bien nivelada deben evitarse declives, desviaciones laterales o cualquier irregularidad que posteriormente influya en las mediciones realizadas. En

nuestro caso nivelar la zona de prueba fue difícil ya que esta zona no tiene soportes o algún dispositivo que impida que se elongue; esto se corrigió un poco perforando el acrílico de tal manera que al ser atornillado con la madera le den a ésta una posición paralela, (Fotografía 4.8.1).

#### 4.9 CONSTRUCCION DEL DIFUSOR.

El material empleado para construir el difusor podía haber sido lámina calibre 18 como la utilizada en la construcción de las primeras tres etapas, solamente que debido a su forma y a nuestra inexperiencia en trabajos de esa índole nos fue prácticamente imposible construirlo de ese material. Lo que se hizo fue hacer un corazón o alma de madera con la forma del difusor la cual recubrimos posteriormente con lámina delgada y fibra de vidrio.

De las partes de que consta el túnel fue ésta la más difícil de construir debido a las características tan especiales de su geometría. El área transversal inicial del difusor, que se une con la zona de prueba, es cuadrada ( $.25 \text{ m}^2$ ) tiene una longitud de 1.2 m al final de la cual el área se incrementa a  $0.304 \text{ m}^2$  a la vez que toma la forma circular para poder unirse con la unidad impulsora, (Fotografía 4.9.1)

#### 4.10 CONSTRUCCION DEL DISPOSITIVO ANTIGIRO

Debido a las características del ventilador utilizado en este túnel, el aire tiene cierta tendencia a girar por lo que construimos un dispositivo que llamamos antigiro.

Está totalmente construido de lámina negra calibre 22 y consta de cuatro secciones de 20 cm de ancho. Estas secciones están localizadas a la entrada del difusor y sujetos a él por medio de remaches pop; en la parte central se localiza una laminilla que une a la sección superior e inferior de este dispositivo, (Fotografía 4.10.1).

#### 4.11 UNIDAD IMPULSORA

Se designa con este nombre a la última etapa que forma el túnel de viento. Consta de un cilindro metálico de 0.6223 m de diámetro interno y una longitud aproximada de 50 cm, en cuyo interior va instalado un motor cuyas características son

- síncrono
- tres fases
- corriente alterna
- potencia 1 h.p.

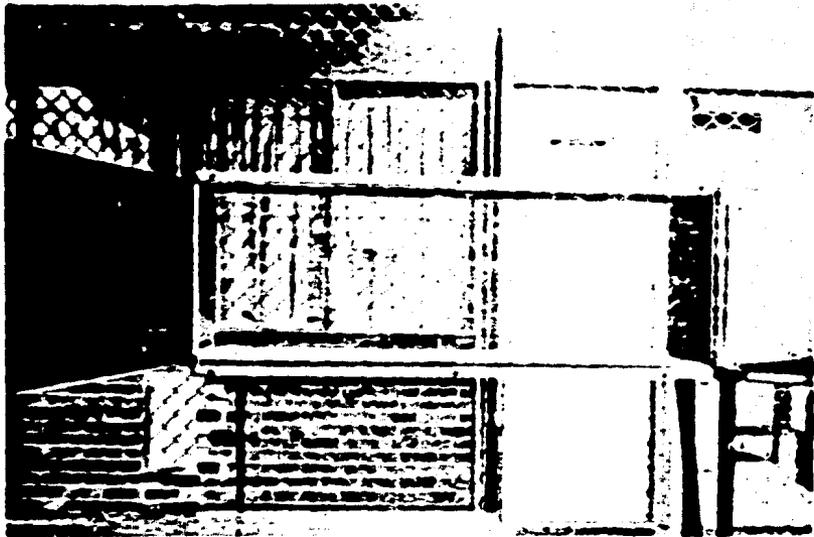
El motor tiene acoplado un ventilador axial de 8 aspas que proporciona

- presión estática 0.5" de agua

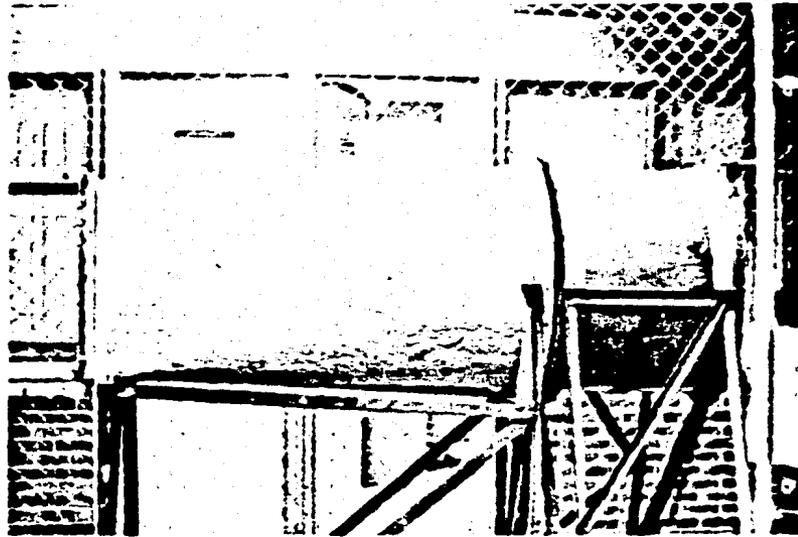
- 3650 rpm
- gasto volumétrico  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$

Como no se construyó el motor ni el ventilador, lo que se hizo fue fijar las dimensiones de la zona de prueba, el gasto volumétrico, y posteriormente elegir, con base en nuestras necesidades, el motor y el ventilador (ref. 1 y 2).

Comercialmente el motor y el ventilador se pueden adquirir conociendo el gasto de aire que se va a manejar y la presión estática en cm de agua que se requieren. El ventilador puede ser de varios tipos: axial, centrífugo o radial. Se adquirió un ventilador axial debido a que este tipo de ventiladores son adecuados cuando se manejan bajas presiones.



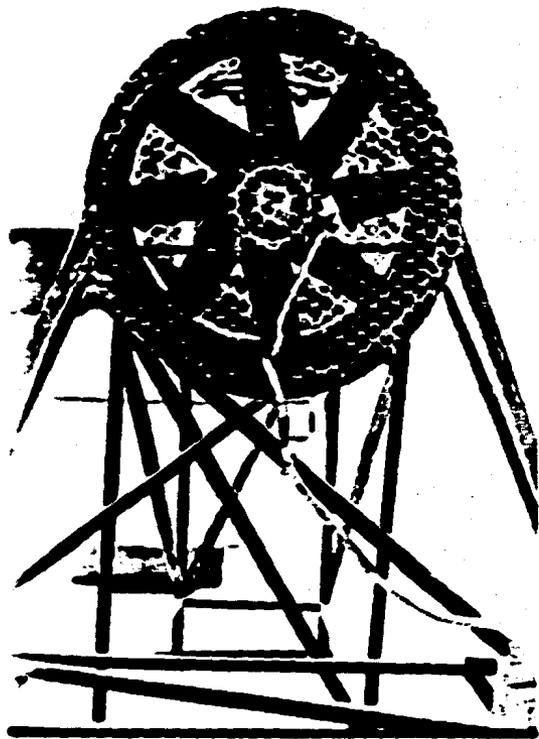
**Fotografía 4.8.1 Zona de prueba, donde se observa la forma en que se une con la tercera etapa y el difusor**



**Fotografía 4.9.1 Difusor. Se aprecia su unión con la zona de prueba y la unidad de transmisión.**

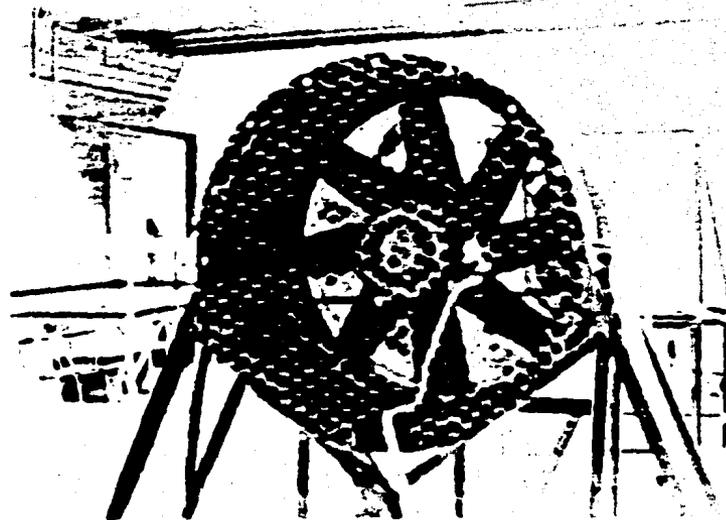
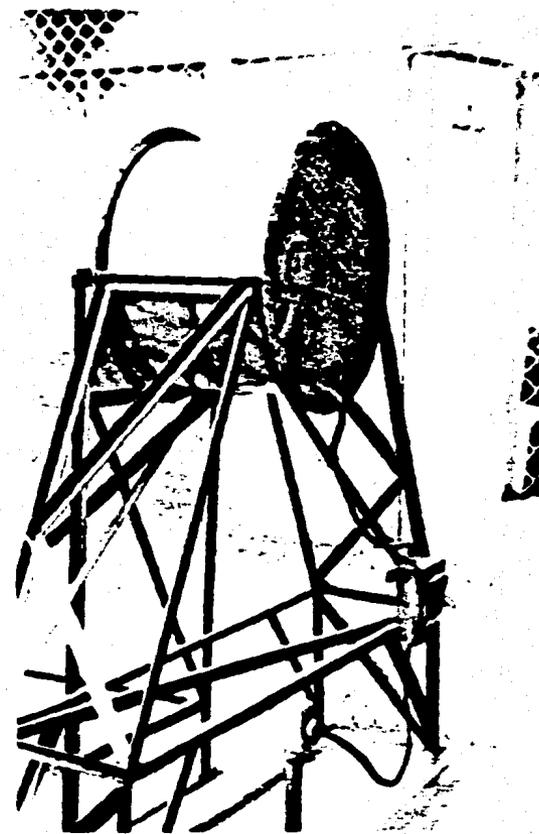


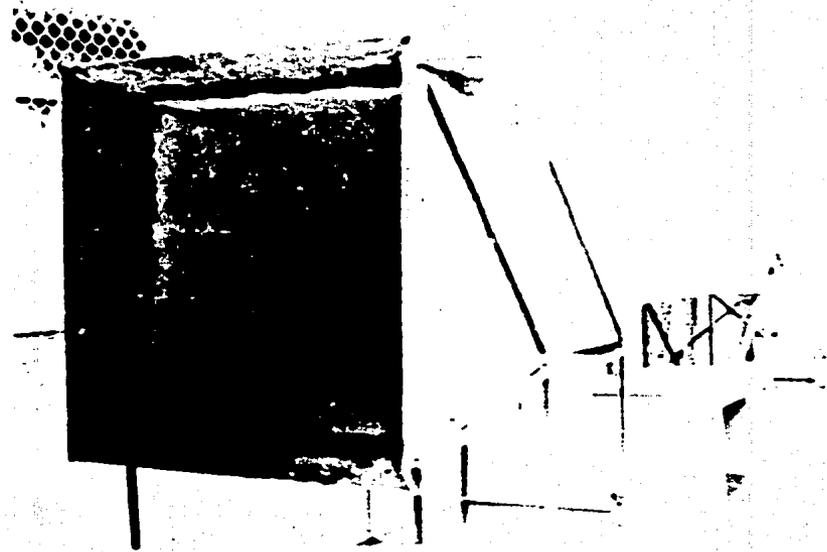
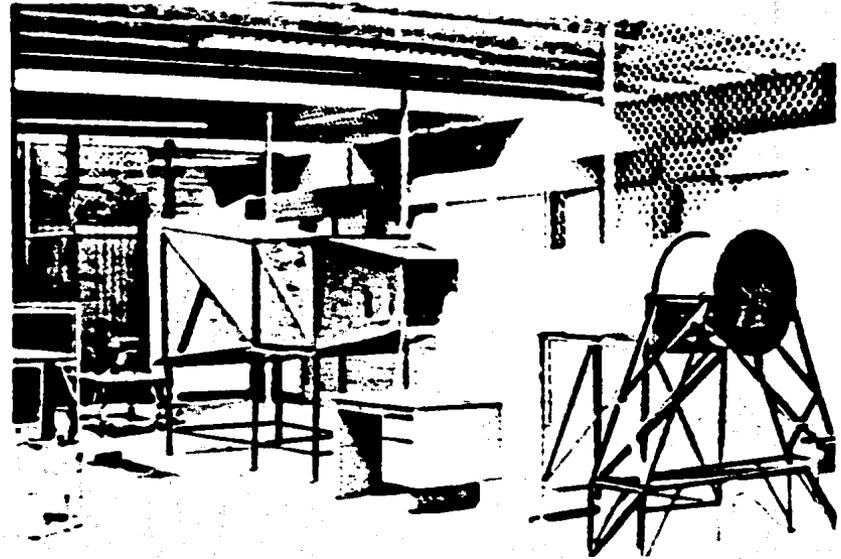
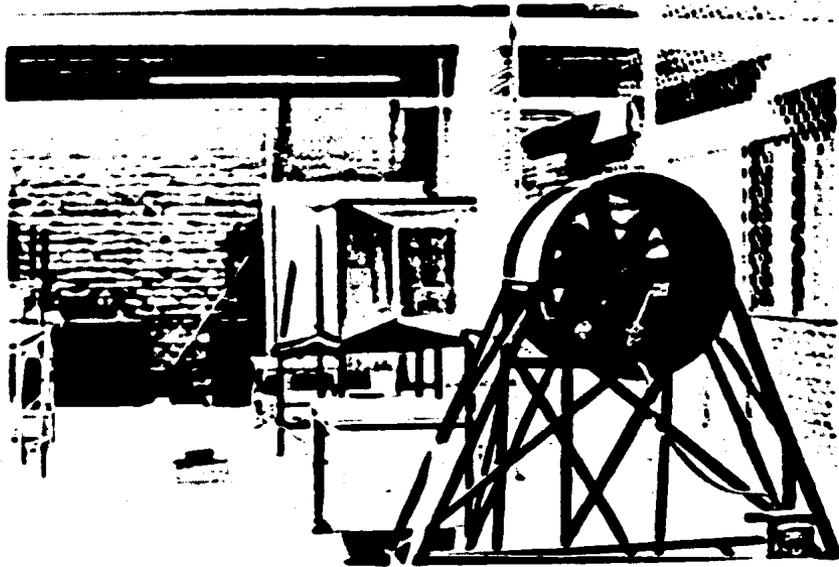
**Fotografía 4.10.1  
Dispositivo antigiro**



### Unidad impulsora.

Varios aspectos de la unidad impulsora, donde se observa el soporte, el ventilador, el motor, la unión con el difusor, la ubicación del interruptor y las mallas que protegen al ventilador.





Aspecto final del túnel de viento

## CAPITULO 5

### PRUEBAS

En este capítulo se describen los dispositivos de medición utilizados para obtener la distribución de la presión total y estática, la secuencia que se siguió para calcular la velocidad en la zona de prueba, así como también el cálculo detallado de las constantes que intervienen en su obtención.

#### 5.1 DISPOSITIVOS DE MEDICION

Básicamente se utilizaron dos dispositivos de medición:

- Micromanómetro diferencial
- Tubo de Pitot

Micromanómetro diferencial. Es un dispositivo útil para medir la carga de presión tanto total como estática, la cual se registra por una diferencia de altura de su fluido de trabajo. Se construyó con un soporte de madera de 50 cm de longitud, 15 cm de ancho y 2 cm de espesor, 50 cm de cinta métrica y una manguera de

plástico de diámetro interno 3 mm.

La manguera de plástico se fijó en el soporte de madera por medio de grapas con aislante plástico y se le dió una forma de "U" (Fotografía 5.1.1.)

La presión dentro de la zona de prueba resultó ser muy pequeña por lo que, con el objeto de obtener lecturas más precisas, se utilizó alcohol como fluido de trabajo del micromanómetro dándosele a éste una inclinación de  $15^\circ$  respecto a la horizontal para amplificar adecuadamente las lecturas de presión.

La densidad del alcohol es menor que la del agua ( $\rho_a = 822 \text{ kg/m}^3$ ) lo que permite tomar lecturas de presión muy bajas; el alcohol en ductos de diámetro pequeño muestra una mayor adhesión que cohesión, forma burbujas con el aire difíciles de eliminar; los manómetros que utilizan alcohol como fluido de trabajo son de respuesta rápida pero es necesario esperar un tiempo relativamente grande para que se estabilicen y así poder efectuar las lecturas requeridas.

Tubo de Pitot. Es el dispositivo más común para determinar la carga total de un chorro de aire. Existen principalmente dos tipos: el convencional y el estático, éste último determina tanto la presión total  $(p + 1/2 \rho v^2)$  como la estática  $(p)$ .

Los tubos de pitot estáticos constan de dos tubos concéntricos, en el cual el tubo externo posee unos orificios localizados a una distancia de 3 a 8 veces el diámetro externo que le sirven para medir la presión estática ( $p$ ). Por el tubo interno para la señal que registra la presión total ( $p + 1/2 \rho v^2$ ), en donde la presión diferencial es  $1/2 \rho v^2$  por medio de la cual se calcula finalmente la velocidad.

En este caso el tubo de Pitot que se utilizó fue del tipo convencional que registra únicamente la presión total. Se eligió éste, ya que permite tener ciertas variaciones respecto a su ángulo de ataque lo que no se tiene en un tubo de Pitot estático (ref. 5).

La presión total se obtiene poniendo el orificio del tubo de Pitot opuesto y paralelo a la dirección del flujo de aire (Fotografía 5.1.2).

La presión estática puede medirse con el mismo tubo de Pitot, solamente hay que girarlo  $90^\circ$  en relación a la dirección del flujo de aire.

Las características del tubo de Pitot construido especialmente para efectuar las mediciones de presión mencionadas anteriormente son las siguientes: es completamente de acero inoxidable, tiene un diámetro externo de 3.2 mm, un diámetro interno de 2.6 mm, 0.3 mm de espesor; longitud 48 cm y un brazo de 7.5 cm (Fig.5.1.3)

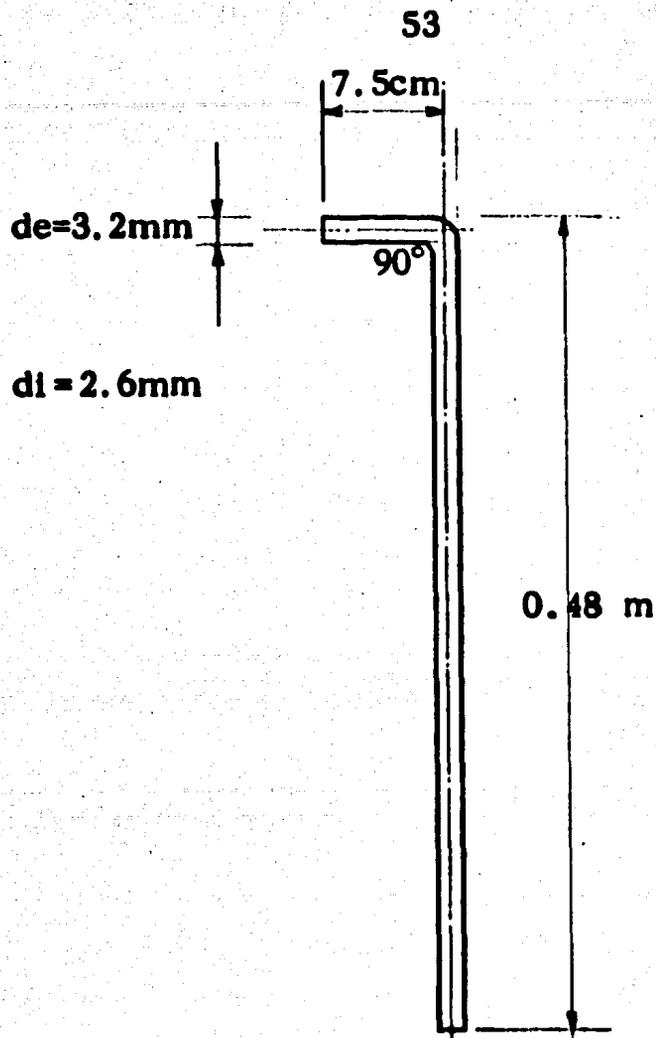


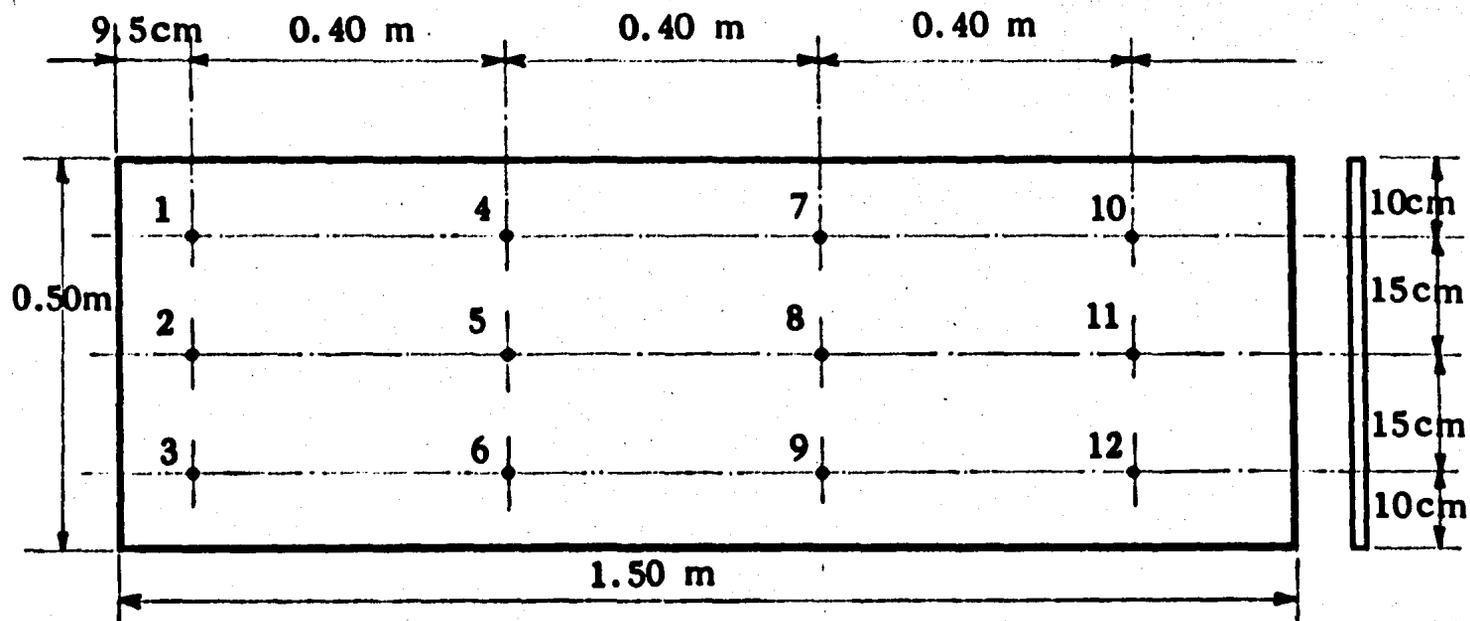
Fig. 5.1.3 Tubo de Pitot

Antes de efectuar las mediciones de presión es necesario calibrar o comparar el tubo de Pitot construido recientemente con algunos cuyo comportamiento se conozca. El tubo de Pitot descrito fue comparado con otros dos, obteniéndose resultados similares.

## 5.2 MEDICIONES DE LA CARGA TOTAL

Para poder medir la presión total y estática en la zona de prueba se tuvo que perforar la cara inferior de la misma. Se hicieron 12 per-

foraciones con una broca de diámetro  $7/32''$ .



**Distribución de los orificios en la cara inferior de la zona de prueba.**

El tubo de Pitot se graduó a 10, 25 y 40 cm contados a partir de su parte superior y se introdujo en cada uno de los orificios de la cara inferior de la zona de prueba. Las mediciones se hicieron con el tubo de Pitot a una altura de 10, 25 y 40 cm en relación a la superficie de la cara inferior de la zona de prueba dando como resultado un valor de cero para la presión total en todos los orificios. Recordemos que el micromanómetro diferencial tiene una inclinación de  $15^\circ$

respecto a la horizontal.

### 5.3 MEDICIONES DE LA CARGA ESTÁTICA

Para obtener las mediciones de la presión estática se siguió el mismo procedimiento que en la sección anterior, con la diferencia de que el tubo de Pitot permaneció perpendicular a la dirección del flujo de aire. Para tomar las mediciones el tubo de Pitot se giró hacia el centro de la zona de prueba al igual que hacia las paredes de la misma, obteniéndose en ambos casos una presión estática negativa, lo que se tradujo, en el micromanómetro, en un desplazamiento de la columna de alcohol.

Realizadas todas las mediciones de la presión estática en la zona de prueba a las distintas antes mencionadas se vió que permanecía prácticamente constante. En la tabla 5.1 se muestran las mediciones obtenidas tanto de la presión estática como de la presión total y las distancias correspondientes a cada una de ellas donde fueron tomadas, en donde las alturas leídas se designan por  $\Delta H$ .

### 5.4 CALCULO DE LA VELOCIDAD

En la sección 3.5 se supuso una velocidad de 10 m/s en la zona de prueba; ahora conociendo la presión estática y la presión total dentro de la zona de prueba calcularemos la velocidad en ella, para lo cual

es necesario conocer la densidad del aire.

Utilizando la ecuación de los gases perfectos (ref. 7)

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (5.4.1)$$

donde  $p$  es la presión absoluta,  $\rho$  la densidad del aire,  $R$  la constante del aire y  $T$  la temperatura absoluta.

Despejando  $\rho$  tenemos

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (5.4.2)$$

donde

$$R = 287.3348 \text{ J/kgm-k}$$

$$p = 76982.2025 \text{ N/m}^2$$

$$T = 293 \text{ k}$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ec. (5.4.2)

$$\rho = \frac{76982.2025 \text{ N/m}^2}{287.3348 \text{ J/kgm-k} (293 \text{ k})}$$

$$\rho = 0.914396 \text{ kgm/m}^3$$

De acuerdo a lo expuesto en la sección 5.1 se indicó - que se empleó alcohol como fluido de trabajo en el micromanómetro - por lo que es necesario conocer su densidad.

Utilizando la ecuación

$$\rho_a = \frac{m}{v} \quad (5.4.3)$$

donde  $\rho_a$  es la densidad del alcohol,  $m$  es la masa, kg, y  $v$  el volumen,  $m^3$ .

En el laboratorio se pesaron 10 ml de alcohol en una balanza de precisión obteniéndose un peso de 8.22 gr. Sustituyendo valores en la ec. (5.4.3) y convirtiendo las unidades a  $kg/m^3$  se tiene

$$\rho_a = 822 \text{ kg/m}^3$$

Por otro lado se tiene que

$$P_t = P_s + P_d \quad (5.4.4)$$

donde  $P_t$  es la presión total,  $P_s$  presión estática y  $P_d$  presión dinámica.

En este caso la presión total es cero (ver secc. 5.2) por lo que la ec. (5.4.4) se reduce a

$$P_s + 1/2 \rho v^2 = 0 \quad (5.4.5)$$

Despejando la presión dinámica obtenemos

$$1/2 \rho v^2 = - P_s \quad (5.4.6)$$

Ahora de la ec. (5.4.6) despejamos la velocidad

$$V = \sqrt{\frac{-2(P_s)}{\rho}} \quad (5.4.7)$$

pero

$$P_s = \rho_a (g) \Delta H \quad (5.4.8)$$

y

$$\Delta H = \Delta H' \text{ sen } 15^\circ \quad (5.4.9)$$

Sustituyendo la ec. (5.4.9) en la ec. (5.4.8)

$$P_s = \rho_a (g) (\Delta H' \text{ sen } 15^\circ) \quad (5.4.10)$$

donde  $g = 9.81 \text{ m/s}$

Sustituyendo la ec. (5.4.10) en la ec. (5.4.7) se tiene

$$V = \sqrt{\frac{-2 \rho_a (g) (\Delta H' \text{ sen } 15^\circ)}{\rho}} \quad (5.4.11)$$

como  $\Delta H'$  son presiones negativas se tiene finalmente

$$V = \sqrt{\frac{-2 \rho_a (g) (-\Delta H' \text{ sen } 15^\circ)}{\rho}} \quad (5.4.12)$$

Sustituyendo valores en la ec. (5.4.12) tenemos

$$V = \sqrt{\frac{-2(822) (9.81) (-0.02 \text{ sen } 15^\circ)}{0.9143}}$$

$$V = 9.5544 \text{ m/s}$$

## 5.5 CALCULO DE LA VELOCIDAD PROMEDIO EN CADA UNA DE LAS SECCIONES DEL TUNEL.

Para calcular la velocidad en cada una de las secciones que integran el túnel de viento es necesario conocer el gasto volumétrico en la zona de prueba.

El gasto volumétrico está dado por

$$Q = AV \quad (5.5.1)$$

donde A es el área transversal,  $m^2$ , y V la velocidad, m/s.

Suponiendo una velocidad en la zona de prueba de 10 m/s y conociendo el área transversal de la misma. ( $0.25 m^2$ ), (Fig. 4.1) se pueden sustituir los valores en la ec. (5.5.1)

$$Q = 2.5 m^3/s$$

El gasto en masa está dado por

$$\dot{M} = \rho Q \quad (5.5.2)$$

por lo que

$$M = (0.9143) (2.5)$$

$$\dot{M} = 2.285 \text{ kg/s}$$

### VELOCIDAD EN LA PRIMERA ETAPA

Despejando la velocidad de la ec. (5.5.1) resulta

$$V = \frac{Q}{A_2} \quad (5.5.3)$$

donde  $A_2$  es el área de la primera etapa y tiene un valor de 1.44  $m^2$ , por lo que

$$V = \frac{2.5}{1.44}$$

$$V = 1.736 \text{ m/s}$$

#### VELOCIDAD EN LA SEGUNDA ETAPA

Utilizando la ec. (5.5.3) y sustituyendo el área transversal de la segunda etapa ( $A_3$ )

$$A_3 = 0.7396 \text{ m}^2 \quad (\text{Fig. 4.1})$$

$$V = \frac{2.5}{0.7396}$$

$$V = 3.38 \text{ m/s}$$

#### VELOCIDAD A LA SALIDA DE LA TERCERA ETAPA

Como esta sección tiene la misma área transversal que la sección de prueba, ambas tienen la misma velocidad, es decir 10 m/s (secc. 5.5)

#### VELOCIDAD A LA SALIDA DEL DIFUSOR

Esta sección tiene una área transversal mayor que el área de la sección de prueba, se presenta aquí una caída de velocidad.

$$A_5 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (\text{la sección es cilíndrica})$$

donde  $A_5$  es el área transversal del difusor y  $d$  el diámetro

$$A_5 = \frac{3.141592 (0.6223)^2}{4}$$

$$A_5 = 0.30367 \text{ m}^2$$

Sustituyendo  $A_5$  en la ec. (5.5.3) se tiene

$$V = \frac{2.5}{0.30367}$$

$$V = 8.2326 \text{ m/s}$$

## 5.6 PERFIL DE VELOCIDADES

Una vez calculadas las velocidades en cada una de las etapas del túnel de viento se puede construir gráficamente un perfil de velocidades a lo largo de él.

La presión estática, tomada a las distancias tabuladas en la tabla 1, es constante al igual que la presión total y como la velocidad promedio solo depende de la presión dinámica se tiene finalmente una velocidad promedio constante en la zona de prueba (ver gráfica 5.6)



**Fotografía 5.1.1 Micromanómetro diferencial**

**Medición de la presión estática**



**Medición de la presión total**



**Fotografía 5.1.2 Tubo de Pitot**

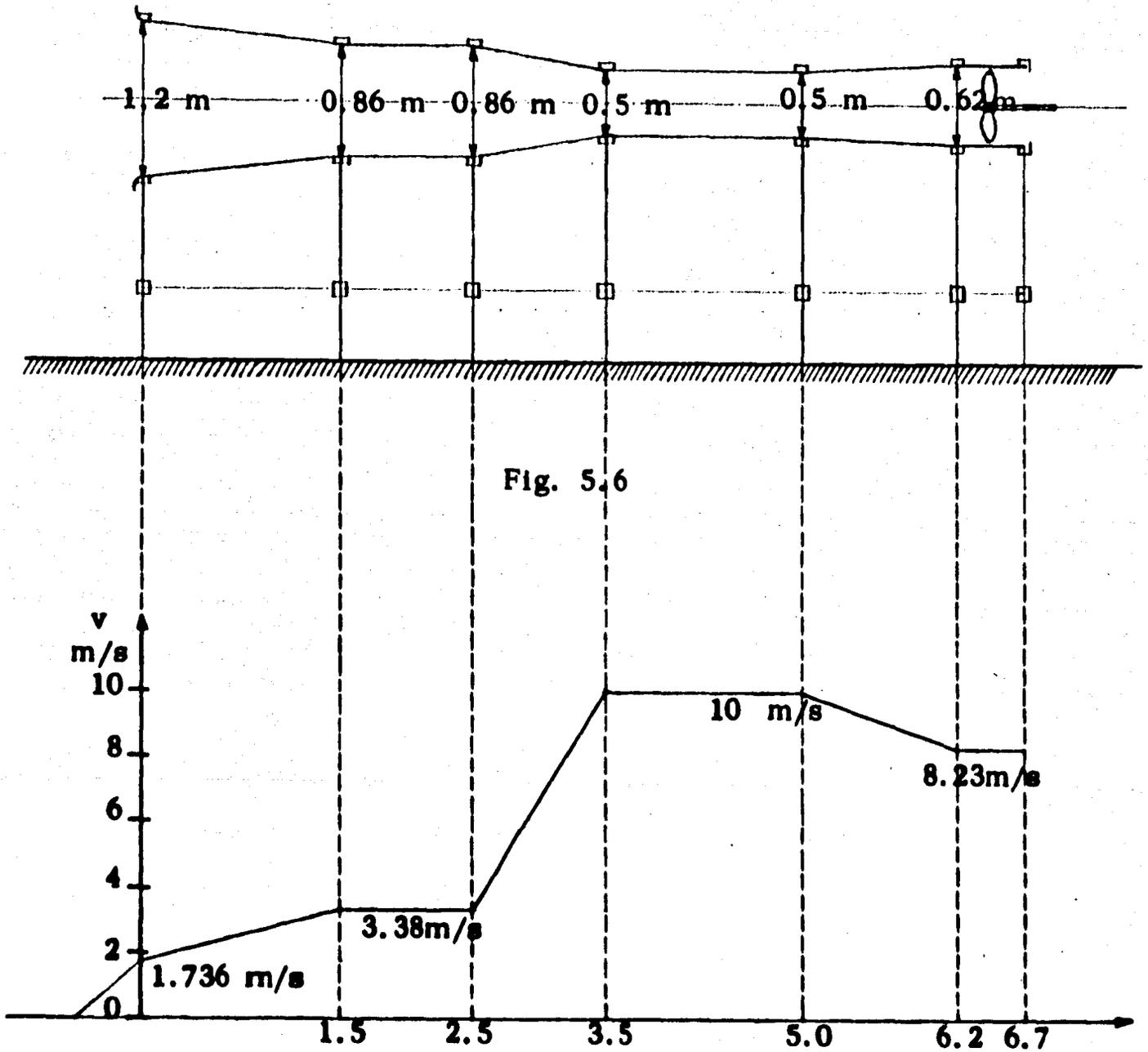


Fig. 5.6

Gráfica 5.6 PERFIL DE VELOCIDADES

## **CAPITULO 6**

### **RESULTADOS**

En este capítulo describiremos en forma resumida los principales aspectos relacionados con el túnel de viento, tanto en la construcción del mismo como en las pruebas realizadas en él.

#### **6.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONSTRUCCION DE LAS TRES ETAPAS DEL TUNEL DE VIENTO.**

En lo referente a su diseño se ha visto que las dimensiones de estas etapas fueron las adecuadas, ya que sí proporcionan, tanto el gasto como la velocidad del aire requeridos en la zona de prueba.

La primera etapa admite el aire necesario que pasará por todo el túnel y a la vez le imprime al aire un primer incremento de velocidad. La segunda etapa mantiene el aire a la misma velocidad a la que le ha sido entregada; aunque claro está que esto no es totalmente cierto dado que aquí se localiza el panel y, además de las

LECTURA N°	ORIFICIO N°	POSICION (CM)			$\Delta H'$ (CM) ALCOHOL	PRESION TOTAL POSICION (CM)			$\Delta H'$ (CM) ALCOHOL
		x	y	z		x	y	z	
1		2.5	9.5	10	2	10	2	10	0
2	1	17.5		25	2	"	"	25	0
3				40	2	"	"	40	0
4		17.5	9.5	10	2	25	2	10	0
5	2	32.5		25	2	"	"	25	0
6				40	2	"	"	40	0
7		32.5	9.5	10	2	40	2	10	0
8	3	47.5		25	2	"	"	25	0
9				40	2	"	"	40	0
10		2.5	47.5	10	2	10	40	10	0
11	4	17.5		25	2	"	"	25	0
12				40	2	"	"	40	0
13		17.5	47.5	10	2	25	40	10	0
14	5	32.5		25	2	"	"	25	0
15				40	2	"	"	40	0
16		32.5	47.5	10	2	40	40	10	0
17	6	47.5		25	2	"	"	25	0
18				40	2	"	"	40	0
19	7	2.5	87.5	10	2	10	80	10	0
20		17.5		25	2	"	"	25	0
21				40	2	"	"	40	0
22		17.5	87.5	10	2	25	80	10	0
23	8	32.5		25	2	"	"	25	0
24				40	2	"	"	40	0
25		32.5	87.5	10	2	40	80	10	0
26	9	47.5		25	2	"	"	25	0
27				40	2	"	"	40	0
28	10	2.5	127.5	10	2	10	120	10	0
29		17.5		25	2	"	"	"	0
30				40	2	"	"	40	0
31		17.5	127.5	10	2	25	120	10	0
32	11	32.5		25	2	"	"	25	0
33				40	2	"	"	40	0
34		32.5	127.5	10	2	40	120	10	0
35	12	47.5		25	2	"	"	25	0
36				40	2	"	"	40	0

TABLA 5.1

Lectura de las Presiones estática y total en diferentes puntos de la zona de prueba.

NOTA: La gravedad específica del alcohol es 0.822 (obtenida experimentalmente en el Lab. Fluidos y Térmica).

pérdidas debidas a la fricción superficial de las paredes, se agregan las pérdidas debidas a él.

La tercera etapa incrementa la velocidad del aire hasta aproximadamente 10 m/s y así lo entrega a la zona de prueba (ver sección 5.6)

Las velocidades obtenidas en las diferentes etapas del túnel de viento se calcularon conociendo el gasto en la zona de prueba, lo que implica que no se obtuvieron por medición directa.

## 6.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONSTRUCCION DE LA ZONA DE PRUEBA Y DEL DIFUSOR.

La zona de prueba es la parte más crítica del túnel de viento y es donde se comprueba que todas las demás etapas del mismo han servido para alcanzar las condiciones requeridas del flujo, -- como son en este caso, baja velocidad y un flujo contínuo y uniforme.

Dadas las características de la zona de prueba, es fundamental que deba de estar lo mejor construida y nivelada, ya que -- aquí se van a efectuar las mediciones requeridas para el experimento que se va a realizar.

Las mediciones efectuadas en la zona de prueba tuvieron el propósito de comprobar de una manera directa y práctica la velocidad promedio del aire, obteniéndose para ello la tabla 1 del capítulo 5. Después de efectuar los cálculos necesarios para tal fin se dedu-

ce que la velocidad en la zona de prueba es aproximadamente igual a la velocidad que se esperaba desde su diseño preliminar.

La visibilidad que tiene, gracias a sus dos caras laterales de acrílico, es adecuada y permite a la vez efectuar una gran diversidad de pruebas ya que el acrílico es fácil de perforar (para poder hacer apoyos, uniones, etc.) y además las cuatro caras de esta zona son intercambiables.

En lo referente al difusor diremos que debido a los materiales empleados en su construcción (lámina y fibra de vidrio) es posible acoplarlo bastante bien tanto con la zona de prueba como con la unidad impulsora.

Por otra parte pruebas con humo e hilos paralelos a la dirección del flujo dentro de la zona de prueba demostraron que el flujo de aire tenía una tendencia de giro debida al ventilador, lo que hizo que se construyera un dispositivo capaz de romper o destruir esa tendencia de giro.

Los resultados obtenidos con la instalación del dispositivo antigiro a la entrada del difusor fueron satisfactorios, ya que se logró mejorar la orientación del flujo de aire evitando en cierto grado su tendencia de giro en el interior del túnel.

### 6.3 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA ADAPTACION DE LA UNIDAD IMPULSORA

En lo referente al ventilador axial los resultados obtenidos han sido satisfactorios ya que logró obtener un flujo de aire constante y uniforme, la velocidad requerida en la sección de prueba y un gradiente de presiones que hacen posible que el flujo de aire sea el indicado de acuerdo al diseño.

Resultados calculados en la sección 5.4 muestran que si la presión disminuye la densidad del aire se reduce lo que repercute en un incremento de la velocidad alcanzada por el ventilador.

El ventilador al igual que todo sistema giratorio produce vibraciones, las cuales se pueden propagar a lo largo del túnel de viento, siendo indeseables. Para eliminarlas fue necesario despegar la unidad impulsora aproximadamente 0.5 cm del difusor; esto es posible ya que el soporte del difusor está construido por separado, es decir no está unido con el soporte del ventilador.

### 6.4 CONSIDERACIONES DE LAS MEDICIONES REALIZADAS EN LA ZONA DE PRUEBA.

Las mediciones realizadas en la zona de prueba fueron:

- con la zona de prueba cerrada
- con la zona de prueba abierta, es decir, sin una de sus caras laterales

En ambos casos se empleó un tubo de Pitot convencional y un micromanómetro diferencial con alcohol.

Los resultados obtenidos con la zona de prueba totalmente cerrada son los esperados (tabla 1 cap 5) donde se observa que la presión total y estática son constantes.

Quitando una de las caras laterales de la zona de prueba, el tubo de Pitot no registró ninguna lectura cerca de la unión con el segundo efusor (tercera etapa) pero a medida que lo acercábamos al difusor se detectaban tanto presión total como estática aunque ambas negativas, llegándose a obtener presiones estáticas de 2.5 cm de columna de alcohol a la entrada del difusor (este resultado hay que multiplicarlo por  $\text{sen } 15^\circ$  debido al ángulo empleado para realizar tal medición).

## CAPITULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente en este capítulo se mencionan algunas conclusiones que se pueden establecer basándose en la experiencia adquirida durante el cálculo y construcción del túnel de viento; asimismo se exponen las principales recomendaciones para un buen diseño.

#### 7.1 RECOMENDACIONES DE DISEÑO

Es recomendable utilizar relaciones de contracción grandes para disminuir la turbulencia del flujo del aire, mejorar la distribución de la velocidad y, además, reducir la longitud del túnel de viento.

Se recomienda que los cambios de dirección a lo largo de la trayectoria del flujo de aire sean lo más ligeros posible para evitar turbulencias, remolinos e irregularidades en el flujo debido al desprendimiento de la capa límite.

En los difusores se recomienda utilizar ángulos de divergencia de máximo  $7^\circ$ , los ángulos más usuales son de  $5^\circ$  a  $7^\circ$ .

En lo referente al tipo de ventilador que se piense utilizar, debe tenerse en cuenta lo siguiente: elegir un ventilador axial - si se van a manejar grandes cantidades de aire contra presiones muy bajas; para manejar cualquier cantidad de aire contra presiones altas, es recomendable utilizar un ventilador centrífugo con paletas hacia - - adelante o hacia atrás dependiendo si se van a manejar bajas o altas- velocidades respectivamente. Además se recomienda que la capacidad del ventilador sea, por lo general, 10 por ciento mayor que la calcula\_ da, debido a fugas que se tengan en el túnel, pérdidas por accesorios adicionales, etc..

El número de aspas del ventilador es muy variable y -- arbitrario algunas veces. El número mínimo, generalmente, es de - cuatro, pero si se desea tener un flujo de aire uniforme es recomendable utilizar ventiladores con un mayor número de aspas.

## 7.2 CONCLUSIONES RELACIONADAS CON EL CALCULO

Como se recordará, en la sección 3.4, se describió - en forma resumida y práctica la secuencia que se siguió para la selec\_ ción de las etapas que constituyen el túnel de viento. Dichas dimen- siones se ajustan a patrones ya establecidos.

Por medio de las pruebas realizadas en la zona de prueba del túnel de viento se ha comprobado, gratamente, que la velocidad del flujo de aire es aproximadamente igual a la establecida desde las condiciones de diseño. Por lo anterior se puede afirmar que las dimensiones del túnel de viento están realmente dentro de las especificaciones de diseño recomendadas por la bibliografía. Las dimensiones de cada una de las etapas se justifica ya que se logran las condiciones, en el flujo del aire, de diseño. Una conclusión inherente a la anterior es que la relación de contracción, utilizada en este túnel, es bastante aceptable y además está dentro de las relaciones de contracción sugeridas por la bibliografía al respecto (desde 4 a 1 hasta un poco menor de 10 a 1).

Por otra parte es recomendable utilizar, en las diferentes etapas que constituyen el túnel, ángulos de convergencia o divergencia pequeños; en este túnel esa es la tendencia, lo anterior involucra que deben evitarse los cambios bruscos de dirección en el flujo.

### 7.3 CONCLUSIONES RELACIONADAS CON LA CONSTRUCCION

En esta sección se establecerán algunas conclusiones que se obtuvieron en la construcción del túnel de viento esperando sean de alguna utilidad no solo para la construcción de otro tipo de túnel sino también para la construcción de algún dispositivo en el cual

se tengan restricciones en su construcción debido a sus dimensiones y forma, así como también donde sea perjudicial o inconveniente unir utilizando soldadura.

La construcción de la primera etapa del túnel presentó varios problemas; entre ellos, el principal fue la imposibilidad de construirlo de una sola pieza debido a su gran tamaño y a la forma que tiene. Cuando se presenta este problema se recomienda diseñar la sección o dispositivo con el menor número de uniones. En nuestro caso la primera etapa requirió cuatro uniones.

La segunda etapa es de menor tamaño que la anterior y además es de forma cuadrada lo que facilitó su construcción, empleándose tan solo dos uniones. La tercera etapa no es grande y de no haber sido por la forma que tiene (igual a la primera etapa) hubiera requerido solamente una unión en lugar de las cuatro que se utilizaron.

Como las primeras tres etapas son metálicas las uniones se pueden realizar por medio de soldadura, adhesivos, tornillos, remaches, dobleces, etc..

Dependiendo de las condiciones de diseño se pueden efectuar las uniones por alguno de los procesos anteriores o por una combinación de ellos. En nuestro caso, debido a restricciones impuestas por el diseño, realizamos las uniones por medio de remaches lo que permitió obtener, principalmente, un acabado superficial aceptable, fa

cilidad en la construcción y una gran versatilidad para poder efectuar correcciones posteriores.

Debido a los resultados obtenidos con el uso de los remaches podemos recomendarlos para que sean utilizados en lugares - donde resulte difícil soldar, donde la soldadura resulte inconveniente - debido a los efectos de calentamiento o distorsión de las superficies a unir, donde sea peligroso utilizar la soldadura (instalaciones de gas, - etc.), donde se requieran realizar correcciones posteriores, etc..

En nuestro caso las uniones las realizamos totalmente - con remaches tratando en lo posible de eliminar asperezas superficiales, debidas a los remaches, que incrementen el nivel de turbulencia del flujo interno del aire. Lo anterior fue posible ya que los remaches que se utilizaron para efectuar las uniones internas tienen la cabeza avellanada, lo que permitió que quedaran completamente ocultos.

#### 7.4 CONCLUSIONES RELACIONADAS CON LAS PRUEBAS

Las pruebas efectuadas en la zona de prueba del túnel de viento estuvieron encaminadas a determinar la velocidad media del aire por lo cual fue conveniente utilizar un tubo de Pitot convencional. De las mediciones realizadas con el tubo de Pitot convencional se obtuvieron conclusiones muy positivas. Entre ellas mencionaremos que las lecturas tomadas utilizando el tubo de Pitot convencional son muy-

uniformes y su empleo permite tener ciertos ángulos de variación respecto a la dirección del flujo de aire sin repercusión respecto a la dirección del flujo de aire sin repercutir en las lecturas obtenidas. Lo anterior representa una gran ventaja ya que si se hubiera empleado un tubo de Pitot estático esto no sería posible, puesto que como se sabe, este dispositivo no permite tener ángulos de variación por más pequeños que estos sean, dificultándose por lo tanto la toma de las lecturas.

De acuerdo con las lecturas de la presión estática y total se concluye que ambas permanecen constantes en los diferentes puntos y alturas donde fueron tomadas; la presión estática dentro de la zona de prueba resultó negativa y la presión total nula en todos los casos.

## REFERENCIAS

1. Pope, Alan & Harper, John J., Low-Speed Wind Tunnel Testing, John Wiley & Sons, Inc., 1966
2. Pankhurst, R.C., Holder, D.W., Wind-Tunnel Technique, Pitman, 1952
3. Aynsley, Richard M., A low cost, Low Speed Open Circuit Blower Wind Tunnel For Environmental Aerodynamics, Model Laboratory report MR8, Departament of Architectural Science University of Sidney.
4. Streeter, Víctor L., Mecánica de los fluidos, McGraw-Hill, cuarta edición, 1976
5. Pankhurst, R. C., Bryer, Denis William, Pressure-Probe Methods for Determining Wind Speed and Flow Direction, National Physical Laboratory, London, 1971
6. Osborne, Woods, C. G., Turner, Gufa Práctica de la Ventilación, Barcelona, Blume, 1970
7. Hernández Goribar, Eduardo, Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración, Editorial Limusa, 1975
8. Burgess, H.Jennings, Environmental Engineering Analysis and Practice, International Texbook Company, 1970
9. Bradshaw, P., Experimental Fluid Mechanics, 2nd. ed., Pergamon Press, 1970

10. Goldstein, S., Modern Developments in Fluid Dynamics, volume 1, Dover Publications, Inc., 1965
11. Prandtl, L. Tietjens, Applied Hidro-and Aeromechanics, Dover Publications, Inc., 1934