



UNIVERSIDAD PANAMERICANA

SEDE GUADALAJARA

" TUNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS  
AERODINÁMICAS "

HECTOR ENRIQUE GÓMEZ ARCEO

Tesis presentada para optar por el título de Licenciado en  
Ingeniería Electromecánica con Reconocimiento de Validez  
Oficial de Estudios de la SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA,  
según acuerdo número 00933087 con fecha 29-1-93.

Zapopan, Jal., Septiembre de 1996.



54719

adentro  
269

TE

CLASIF: 11 1996 0011

ADQUIS: 54719

FECHA: 14/09/04

DONATIVO DE 2

\$ \_\_\_\_\_

*Apoyos al 50189*



**UNIVERSIDAD PANAMERICANA**

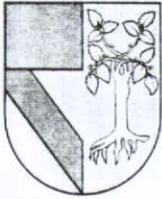
SEDE GUADALAJARA

**" TUNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS  
AERODINÁMICAS "**

**HECTOR ENRIQUE GÓMEZ ARCEO**

Tesis presentada para optar por el título de Licenciado en  
Ingeniería Electromecánica con Reconocimiento de Validez  
Oficial de Estudios de la SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA,  
según acuerdo número 00933087 con fecha 29-I-93.

Zapopan, Jal., Septiembre de 1996.



# UNIVERSIDAD PANAMERICANA

SEDE GUADALAJARA

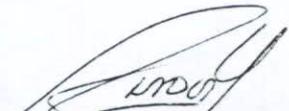
## *DICTAMEN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN*

HECTOR ENRIQUE GOMEZ ARCEO

Presente

En mi calidad de Presidente de la Comisión de Exámenes Profesionales y después de haber analizado el trabajo de titulación en la alternativa tesis titulado "TUNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS AERODINAMICAS", presentado por usted, le manifiesto que reúne los requisitos a que obligan los reglamentos en vigor para ser presentado ante el H. Jurado de Examen Profesional, por lo que deberá entregar ocho ejemplares como parte de su expediente al solicitar el examen.

Atentamente



EL PRESIDENTE DE LA COMISION

Zapopan, Jal. octubre 11 de 1996



UNIVERSIDAD PANAMERICANA  
SEDE GUADALAJARA

Enero 24 de 1996

COMITE DE EXAMENES PROFESIONALES  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA  
UNIVERSIDAD PANAMERICANA

Hago constar que el alumno: **HECTOR ENRIQUE GOMEZ ARCEO**, ha terminado satisfactoriamente el trabajo de tesis titulado: "**TUNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS AERODINAMICAS**", que presentó para optar por el título de la Licenciatura en Ingeniería Electromecánica.

Se extiende la presente para los fines que convengan al interesado.

A t e n t a m e n t e



ING. SERGIO VELAZQUEZ RODRIGUEZ  
Asesor de Tesis  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

DEDICATORIA

A DIOS Y LA VIRGEN POR HABER  
ILUMINADO EL CAMINO DE MI VIDA

A MIS PADRES POR SU AMOR ,  
COMPRESIÓN E INCONDICIONAL  
APOYO PARA HACER DE MI UN HOMBRE  
DE BIEN, SIEMPRE LES ESTARÉ  
AGRADECIDO

A ALEJANDRA POR HABERME AYUDADO  
A LOGRAR UNA DE LAS METAS MAS  
IMPORTANTES DE MI VIDA, TE AMO.

## ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	6
I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
A. Utilidad del análisis dimensional	8
B. Fuerzas sobre los modelos.	18
1. Resistencia	23
II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS AERODINÁMICAS.	
A. Diseño Preliminar	40
B. Memoria de Cálculos	
1. Cálculo de dimensiones físicas	43
2. Cálculo de la potencia requerida para impulsar el ventilador	45
a. Relación de poleas de transmisión de potencia	47
C. Desarrollo y Construcción	48
1. Sistema de control de la velocidad del motor.	56

### III. MANUAL DE OPERACIONES

A. Partes que lo componen	63
---------------------------	----

### IV. VALIDACIÓN Y PRÁCTICAS EFECTUADAS

A. Diseño de prácticas de laboratorio	73
---------------------------------------	----

B. Resultados obtenidos	81
-------------------------	----

CONCLUSIONES	88
--------------	----

BIBLIOGRAFÍA	92
--------------	----

ANEXOS	93
--------	----

## INTRODUCCIÓN

En el ámbito ingenieril, específicamente de diseño, un túnel de viento es conocido como un ducto en el que son simulados los efectos del flujo de aire sobre cierta forma en estudio, con la diferencia de que en el túnel de viento la forma en estudio permanece relativamente estática, siendo el flujo de aire lo que se modifica, para simular las condiciones reales.

La gran utilidad de un túnel de viento para los avances de la ciencia se encuentra en el cuantioso ahorro económico que representa, ya que se estudian las formas pero a escala, gracias a la teoría de modelos. De esta manera, no se arriesgan los grandes capitales que representaría un modelo de tamaño real, ni las vidas humanas en prototipos que podrían resultar fallos o inseguros y, para demostrar esto basta echar un vistazo a la historia de la aviación donde encontraremos que, en vuelos experimentales, perdieron la vida Lilienthal y muchos otros iniciadores de la aviación.

No fue sino hasta que los Hermanos Wright dedujeron que cuanto más aprendían más se convencían de que el elemento básico del vuelo era el control, o sea mantener el equilibrio en el aire inestable. Observaron que cuando una ráfaga desviaba hacia abajo el ala de una ave, esta restablecía el equilibrio levantando en ángulo esa ala al viento y bajando la otra.

Fue entonces cuando decidieron hacer sus propios cálculos a fin de determinar con precisión el grado y dirección de la presión producida en las superficies curvas por los vientos a diversos ángulos. Para ello diseñaron y construyeron un túnel de viento de pruebas aerodinámicas por el que un ventilador arrojaba aire a una velocidad de 40 a 50 Km por hora. En el túnel, colgaron de balanzas sensibles alas en miniatura de diversos diseños y midieron las fuerzas que actuaban sobre ellas. Con las gráficas de estas figuras, los hermanos Wright descubrieron el perfil óptimo de la curva que aumentaría la fuerza de sustentación. Así pues, ahora podrían construir alas de tamaño real cuyo rendimiento podría predecirse.

De una larga historia de experimentos e investigaciones, los expertos en diseño aerodinámico han definido que en el diseño final de un aeroplano, se debe tener presente la

acción recíproca entre los cuatro elementos básicos del diseño de aviones: aerodinámica, propulsión, estructura y control.

Así podemos observar en la sabia naturaleza, que en el ave, cada ala funciona de manera eficiente como ala y hélice combinadas. La mitad interior del ala de un ave, su "brazo", suministra casi toda la fuerza de sustentación. La mitad exterior o "mano", actúa como agente impulsor.

Sin embargo el vuelo práctico y económico dentro de la atmósfera se confina principalmente al que se efectúa por aerodinámica, que literalmente quiere decir "movimiento del aire". Para construir un avión aerodinámico capaz de volar, deben tenerse en cuenta cuatro factores fundamentales: peso, sustentación (fuerza con la que el avión vence la gravedad), resistencia (oposición que presenta al flujo de aire) y fuerza propulsiva.

Así pues, con esta tesis se pretende aparte de hacer un homenaje a todos los iniciadores de la aviación, llevar a cabo la construcción de un túnel de viento de pruebas aerodinámicas de laboratorio, cuyo fin es que sea de utilidad para los estudiantes de ingeniería que no conformes con lo aprendido en clase deseen corroborar ciertos principios de la mecánica de fluidos e introducirse en las bases de la aviación y aerodinámica en general.

En virtud de que la mayoría de las personas piensan que dicho túnel es preferentemente para pruebas de nuevos diseños de aeroplanos, se pretende ampliar este enfoque y hacer entender con dicho túnel al estudiante de ingeniería la utilidad que representan ciertos parámetros aprendidos en la carrera que complementarán sus conocimientos y serán la base para distinguirlo del común denominador de las personas, que ante la incapacidad de profundizarse en términos ingenieriles, se conforman con tranquilizar su natural inquietud de saber los motivos del por qué un monstruo de varias toneladas se eleva ágilmente por el cielo, con la común frase de la "magia de volar".

## I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### A. Utilidad del análisis dimensional.

Si un ingeniero tuviera la información acerca de cada término de las ecuaciones y dispusiera de las herramientas matemáticas o computacionales para resolverlas, podría confiar en el uso de la información que genera un análisis de un flujo. Sin embargo los métodos tan solo analíticos son limitados, debido a la falta de información completa acerca de ciertos fenómenos del flujo (tales como la turbulencia), y la fina dificultad de las matemáticas y los cálculos que se requieren.

Por ejemplo si se decidiera que el flujo es incompresible y laminar, se podría tener un resultado teórico excelente. Sin embargo, si el flujo es turbulento no se puede encontrar un resultado teórico universalmente válido, entonces la única salida viable es la experimentación. La ingeniería en general es una mezcla de la teoría y la experimentación.

Los análisis teóricos pueden bien sugerir diseños tentativos para un avión o una bahía, los diseños que resultan como candidatos se evalúan y refinan por medio de pruebas extensivas. Es por esto que una introducción a la mecánica de fluidos sin considerar las contribuciones de la experimentación sería incompleta.

Desafortunadamente como se mencionó anteriormente aunque casi toda la ingeniería de la mecánica de fluidos se basa en cierto grado en información experimental, en la realidad solo un pequeño porcentaje de ingenieros en fluidos intervienen en la realización de experimentos.<sup>1</sup>

El análisis dimensional es una técnica de compactación o condensación que se utiliza para reducir la complejidad de programas experimentales y, al mismo tiempo, para

---

<sup>1</sup> - SHAMES, Irving H. Mecánica de Fluidos, 3a. ed; Ed. Mc Graw-Hill p.281

incrementar la generalidad de la información experimental.<sup>2</sup> Esta compactación de información que se produce por medio del análisis dimensional también tiene otros usos, como podría ser proporcionar las herramientas para decidir a priori si es probable que un flujo sea laminar o turbulento, o si las suposiciones simplificadoras, tales como la compresibilidad son adecuadas.

Es conveniente hacer notar que el análisis dimensional en ocasiones suele ser confuso para los principiantes, ya que el principio básico que comprende parece obvio, casi trivial, y la confusión surge porque en general se espera que las teorías estén completas; esto es, que lleven hasta una solución final. El análisis dimensional es muy breve para proporcionar una respuesta final a un problema de ingeniería particular; sencillamente conduce a una organización más eficiente de las variables. La respuesta final proviene de la experimentación o de los métodos analíticos, así pues el análisis dimensional indica que las variables se pueden organizar de manera eficiente, y sugiere algunas maneras posibles de como realizar la organización misma; sin embargo no permite encontrar resultados únicos.

Si un fenómeno depende de  $n$  variables dimensionales, el análisis dimensional reduce el problema a solo  $k$  variables adimensionales, donde la reducción es  $n-k= 1,2,3$  o  $4$ , dependiendo de la complejidad del problema. Generalmente  $n-k$  es igual al número de dimensiones independientes del problema; siendo cuatro las básicas para mecánica de fluidos: la masa  $M$ , la longitud  $L$ , el tiempo  $T$  y la temperatura  $\theta$ . El análisis dimensional ofrece varias ventajas, siendo la primera de ellas un enorme ahorro de tiempo y dinero. Supongamos que para determinar la fuerza que actúa sobre un cuerpo inmerso en la corriente de un fluido depende de cuatro dimensiones básicas que podrían ser longitud del cuerpo  $L$ , la velocidad de la corriente  $V$ , de la densidad del fluido  $\rho$  y de su viscosidad.

$$F = f(L, V, \rho, \mu) \quad (1.1)$$

---

<sup>2</sup> - GERHART, Philip/ GROSS, Richard/ HOCHSTEIN, John, Fundamentos de Mecánica de Fluidos, 2a. ed.; Ed Addison-Wesley Iberoamericana, p. 441

Ahora pues, se necesitan unos diez puntos para obtener la curva de comportamiento. Por ende, para determinar la influencia de la longitud del cuerpo en la fuerza se necesitará efectuar el experimento para unas diez longitudes de prueba y, a su vez, para cada longitud de prueba se repetirá el experimento para 10 valores diferentes de la velocidad del fluido, 10 valores de densidad y diez valores de viscosidad, debiéndose realizar en total  $10^4$  experimentos. Suponiendo un costo de N\$ 100.00 nuevos pesos por experimento podemos ver el alto costo en que se incurre. Sin embargo si empleamos el análisis dimensional se puede reducir la ecuación a su forma equivalente.

$$\frac{F}{\rho V^2 L^2} = g\left(\frac{\rho VL}{\mu}\right) \quad (1.2)$$

Así pues, el coeficiente adimensional de la fuerza es ahora sólo función del número de Reynolds, demostrándose que con el análisis dimensional no se pierde ninguna información. Para el ejemplo anteriormente mencionado, bastará con variar diez veces el número de Reynolds, que será nuestra única variable, lo que se puede hacer variando sólo la velocidad  $V$ , en los ensayos en un túnel aerodinámico.

Un segundo aspecto favorable del análisis dimensional consiste en que nos ayuda a pensar y planificar un experimento o teoría, ya que sugiere formas adimensionales de las ecuaciones antes de gastar tiempo y dinero para encontrar las soluciones.

Y una tercera y no menos importante ventaja que nos presenta el análisis dimensional para los fines perseguidos, es que proporciona las leyes de escala que pueden convertir los datos obtenidos sobre un pequeño modelo en información para el diseño de un prototipo. Así pues se pueden medir las fuerzas de sustentación y de arrastre en el modelo de un nuevo diseño de aeroplano para que, si este modelo resulta eficiente, proceder entonces a la construcción de su prototipo, apoyados en las bases experimentales que nos dan las leyes de semejanza.

Es obvio que cada experimento que se realiza en un laboratorio es único, y como la experimentación es costosa y consume mucho tiempo, los resultados experimentales se deben documentar para que no se requiera un nuevo experimento en la siguiente ocasión, cuando surja un problema similar.

Los ingenieros por razones obvias se interesan en los fenómenos físicos. Los parámetros de interés tales como fuerza, velocidad y energía se pueden expresar en términos de una magnitud numérica y las unidades de medición asociadas. Todas las entidades físicas tienen ciertas dimensiones, y una entidad física determinada tiene siempre las mismas dimensiones aun cuando cambien las unidades empleadas para expresar estas dimensiones.

Muchos de los problemas de ingeniería de la mecánica de fluidos se deben resolver mediante la experimentación. Una lista parcial de problemas de la mecánica de fluidos para los cuales no existe una solución analítica completa, incluye la resistencia aerodinámica sobre vehículos aéreos y terrestres, la resistencia de las ondas de superficie sobre el casco de los barcos y los patrones de flujo y erosión en ríos y puertos. Los diseños de la ingeniería de vehículos aéreos, terrestres y marítimos, las mejoras en ríos y puertos y las grandes pruebas se basan en extensas pruebas experimentales. Por supuesto, la construcción y prueba de diversos diseños alternativos, construidos a escala total y operados en todas las condiciones de velocidad del viento, flujo de agua, etc., carece de todo sentido. El único enfoque posible es probar modelos a escala que sean más pequeños que los objetos reales (se pueden emplear modelos a escala más grandes que el objeto real cuando éste es demasiado pequeño para probarse adecuadamente). El análisis dimensional proporciona la clave para relacionar los datos que se obtienen de un experimento modelo con los valores esperados para el objeto a escala completa denominado prototipo. El análisis dimensional también permite a los ingenieros determinar las condiciones que deben mantenerse en el modelo de pruebas si se conocen las condiciones en las cuales debe operar el prototipo.

Así pues, se procederá a definir los parámetros adimensionales más utilizados para la mecánica de fluidos, y los que se considerarán al llevar a cabo prácticas en el túnel de viento:

Siendo el más importante de todos el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} \quad (1.3)$$

Donde  $\rho$  es la densidad de masa,  $\mu$  es la viscosidad,  $U$  la velocidad característica, y  $L$  la longitud característica. Reynolds es importante haya o no superficie libre, despreciándose su efecto fuera de las regiones donde hay gradientes altos de velocidad.

Los números  $Fr$  (Froude),  $Eu$  (Euler),  $We$  (Weber) no intervienen, si no hay superficie libre, excepto si hay posibilidades de cavitación del líquido a valores muy bajos de  $Eu$ . Así pues, para flujos viscosos a bajas velocidades sin superficie libre, el único parámetro adimensional importante es el número de Reynolds.

En flujos de gases a altas velocidades hay cambios significativos de presión, densidad y temperatura, estos cambios termodinámicos introducen dos nuevos parámetros adimensionales:

Número de Mach:

$$Ma = \frac{U}{a} \quad (1.4)$$

donde  $U$  es la velocidad del fluido y  $a$  la velocidad del sonido.

Relación de calores específicos:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (1.5)$$

donde  $C_p$  es el calor específico a presión constante y  $C_v$  el calor específico a volumen constante.

Entrando a la importancia que representa el túnel de viento, se debe señalar que las condiciones del flujo para un modelo de ensayo son completamente semejantes a las del prototipo si los valores correspondientes al modelo y prototipo coinciden para todos los parámetros adimensionales.

Por ser difícil de conseguir la semejanza completa, la literatura ingenieril habla de tipos particulares de semejanza, siendo éstas la geométrica, cinemática, dinámica y térmica.

La semejanza geométrica se refiere a la dimensión longitud  $\{L\}$ , que nos dice: "Un modelo y prototipo son geoméricamente semejantes si, y sólo si, todas las dimensiones espaciales en las tres coordenadas tienen la misma relación de escala lineal."<sup>3</sup>

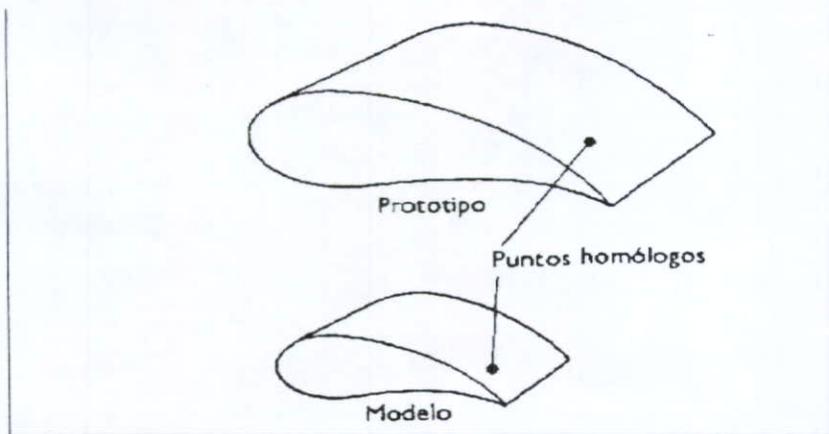


Fig. No. 1 Ejemplo de semejanza Geométrica.

<sup>3</sup> - GERHART, Philip/ GROSS, Richard/ HOCHSTEIN, John, Fundamentos de Mecánica de Fluidos, 2a. ed.; Ed Addison-Wesley Iberoamericana, p.489

Así pues, todas las longitudes entre modelo y prototipo deberán estar referidas a la misma escala, así como los respectivos puntos homólogos (puntos con la misma posición relativa). Todos los ángulos deben conservarse, así como las diferentes direcciones del flujo y la orientación del modelo y prototipo con respecto a los objetos de los alrededores. El usuario de modelos se arriesga cuando utiliza modelos que parecen semejantes en su forma, pero que violan claramente la semejanza geométrica. (ver fig. No. 1)

La semejanza cinemática exige que todas las relaciones entre longitudes homólogas del modelo y prototipo tengan el mismo valor, relación de escala de longitudes y, también, que todas las relaciones entre tiempos homólogos tengan un valor común, relación de escala de tiempos. Langhaar con su definición nos permite entender más claramente las restricciones de esta semejanza:

" Los movimientos de dos sistemas son cinemáticamente semejantes si partículas homólogas alcanzan puntos homólogos en instantes homólogos".<sup>4</sup>

La equivalencia de las escalas de longitud implica simplemente semejanza geométrica, pero la equivalencia de las escalas de tiempo puede exigir consideraciones dinámicas adicionales tales como igualdad de los números de Reynolds y de Mach.

Ahora bien, existe semejanza dinámica cuando modelo y prototipo tienen la misma relación de escala de longitudes, la misma relación de escala de tiempos y la misma relación de escala de fuerzas (o de masa). La semejanza dinámica existe simultáneamente con la semejanza cinemática si todas las fuerzas en el modelo y prototipo guardan la misma proporción. Las leyes de semejanza dinámica aseguran que todas las fuerzas estén en la misma proporción y tengan direcciones equivalentes en modelo y prototipo aunque, en realidad la semejanza dinámica perfecta es una ilusión, ya que la igualdad de los números de Reynolds y de Froude sólo se pueden conseguir con cambios importantes en

---

<sup>4</sup> - - SHAMES, Irving H. Mecánica de Fluidos, 3a. ed; Ed. Mc Graw-Hill p. 291

las propiedades de los fluidos; por el contrario, la mayor parte de los ensayos se hacen en agua o aire, los fluidos más baratos disponibles.

Como ejemplo para entender las semejanzas que deben existir entre modelo y prototipo, se propone el diseño del casco de un barco. Con el fin de determinar el tamaño del sistema de propulsión del barco, se requiere encontrar la fuerza de resistencia sobre el casco a diversas velocidades de crucero. Para estudiar la resistencia, se pretende evaluar modelos. El primer requerimiento de la prueba de modelo es que luzca exactamente como el prototipo; esto es que tenga semejanza geométrica. Cada dimensión de longitud del modelo se relaciona con la dimensión de longitud correspondiente del prototipo, por medio de un factor constante (S) de aumento o disminución a escala:

$$\begin{aligned} \ell_{1,m} &= S\ell_{1,p} \\ \ell_{2,m} &= S\ell_{2,p} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Donde  $\ell_{1,m}$  y  $\ell_{2,m}$  son longitudes características del modelo y  $\ell_{1,p}$  y  $\ell_{2,p}$  son las correspondientes al prototipo. (ver fig. No. 2)

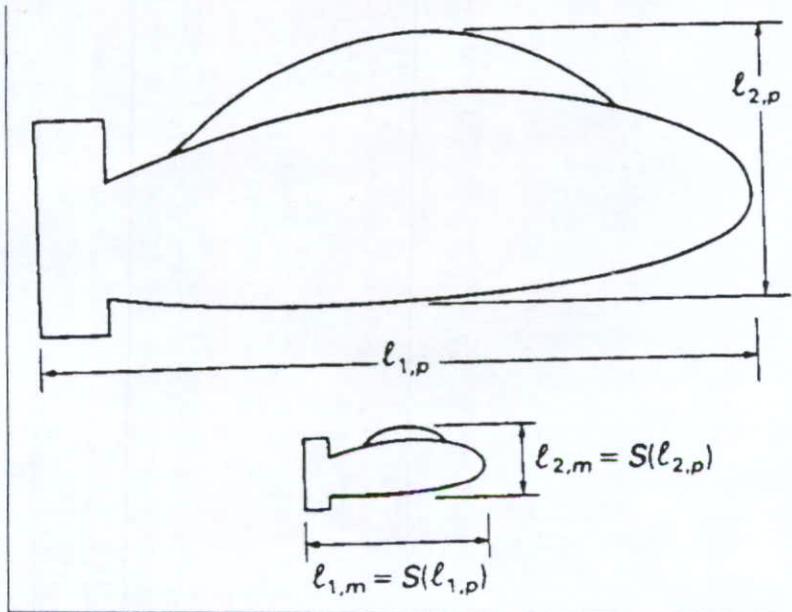


Fig. No. 2 Ejemplo de semejanza aplicada en modelo y prototipo.

Las áreas del modelo son  $S^2$  veces correspondientes a las áreas del prototipo, y el volumen del modelo es  $S^3$  veces el volumen del prototipo.

Se puede establecer que el coeficiente de resistencia para el barco prototipo se define con las siguientes variables:

$$C_{D,p} = f_p(R_p, M_p, W_p, F_p, k_p, \alpha_p) \quad (1.7)$$

donde  $\alpha$  es el ángulo de ataque. Como el prototipo operará en agua, sin duda los efectos de la compresibilidad serán despreciables, por lo que una relación más simple es:

$$C_{D,p} = f_p(R_p, W_p, F_p, \alpha_p) \quad (1.8)$$

Cuando se pruebe el modelo su coeficiente de resistencia seguirá una relación de la misma forma:

$$C_{D,m} = f_m(R_m, W_m, F_m, \alpha_m) \quad (1.9)$$

Mediante el uso de parámetros adimensionales, se removieron los efectos explícitos de tamaño, propiedades del fluido y velocidad, por lo que las funciones  $F_p$  y  $F_m$  se determinan solamente por la forma del prototipo y el modelo. Como el prototipo y el modelo tienen la misma forma,  $F_p$  y  $F_m$  son la misma función. Así la relación:

$$C_D = f(R, W, F, \alpha) \quad (1.10)$$

se aplica tanto al modelo como al prototipo. Para calcular la resistencia en el prototipo, se puede emplear una función  $F$  determinada a partir de las pruebas del modelo.

Este principio se aplica punto por punto, así como también la función completa; si el modelo y el prototipo tienen los mismos números de Reynolds, Weber, Froude y orientación relativa al flujo, tendrán el mismo coeficiente de resistencia (y el mismo coeficiente de sustentación). Esto es, cualquier par de puntos geométricos correspondientes en el modelo y el prototipo (llamados puntos homólogos) tendrán los mismos coeficientes de presión y de fricción.

Las observaciones acerca de la relación entre el flujo del modelo y del prototipo se resumen como sigue:

“ Si un modelo y su prototipo tienen valores iguales de todos los parámetros adimensionales independientes, tendrán valores iguales de todos los parámetros adimensionales dependientes de las variables”.<sup>5</sup>

Este principio se puede emplear para el escalamiento de los resultados del modelo de prueba y con el objeto de determinar las condiciones necesarias (densidad, velocidad, etc.) en un modelo de prueba para reproducir las condiciones de operación del prototipo.

Pareciera que la única dificultad para aplicar este principio radica en determinar cuales parámetros son los relevantes. En general, es evidente la irrelevancia de ciertos parámetros, ya que los efectos que representan no aparecen en el flujo del modelo ni en el prototipo.

Los principios que subyacen en las pruebas con modelos y la igualdad de los diversos parámetros adimensionales entre el modelo y el prototipo se ilustran mediante el concepto de semejanza.

Los ensayos en túneles de viento y en tanques de remolque sobre modelos son una parte importante de cualquier programa de desarrollo, donde se observa que la similitud dinámica entre el modelo y el prototipo casi nunca se consigue en forma completa.

---

<sup>5</sup> - VENNARD, John K./ STREET, Robert L., Elementos de Mecánica de Fluidos, Versión SI, Cía. Editorial Continental S.A. de C.V. México p. 712

## B. Fuerzas sobre los modelos.

En los modelos empleados el fluido es externo a la superficie, por lo que la literatura les denomina flujos externos.

Para efectos de estudio es útil clasificar los cuerpos de trabajo en tres tipos: un cuerpo bidimensional tiene la misma forma en todos los planos perpendiculares a un eje infinitamente largo, un cuerpo tridimensional es finito en todas direcciones, finalmente un cuerpo con simetría axial tiene la misma forma en todos los planos meridionales ( $x, r$ ).

En general se puede apreciar que cuando un cuerpo está inmerso en una corriente, la dimensionalidad y dirección del flujo están determinadas por la dimensionalidad del cuerpo, y por la alineación entre el flujo que los aproxima y el cuerpo mismo. Así pues, los cuerpos bidimensionales producen flujos bidimensionales y bidireccionales cuando no existe flujo en el eje largo del cuerpo, y a su vez los cuerpos tridimensionales producen flujos tridimensionales y tridireccionales. Aun cuando la forma del cuerpo sea la misma en todos los planos perpendiculares al eje ancho, y el flujo de aproximación sea perpendicular a este eje, todavía habrá flujo alrededor de los extremos del cuerpo. Si un cuerpo tridimensional es muy ancho, el flujo en la porción central se podría aproximar como flujo bidimensional.

La fuerza aerodinámica sobre un cuerpo se podría dividir en componentes a lo largo de cualquier sistema arbitrario de ejes. Para el cuerpo bidimensional la fuerza resultante está en el plano del cuerpo. Para un cuerpo con simetría axial, la fuerza resultante está en el plano definido por el eje del cuerpo y el vector de velocidad del flujo que se le aproxima. En cualquier caso, el componente de la fuerza en la dirección del flujo que se aproxima se conoce como resistencia o arrastre, y el componente de la fuerza perpendicular al flujo que se aproxima se conoce como sustentación<sup>6</sup>. (Ver fig. No. 3).

---

<sup>6</sup> - SHAMES, Irving H. Mecánica de Fluidos, 3a. ed; Ed. Mc Graw-Hill p. 293

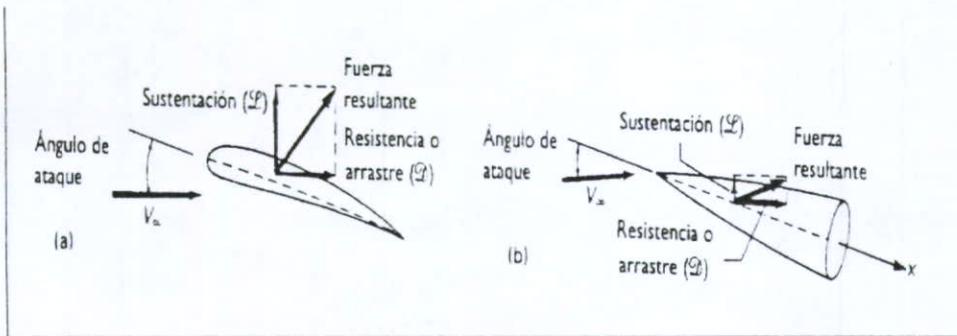


Fig. No. 3 Componentes de la fuerza aerodinámica.

Las fuerzas de sustentación no necesariamente se presentan en todos los flujos; solamente ocurren si existe asimetría. Tal asimetría podría estar causada por el cuerpo o porque el cuerpo y el flujo de aproximación no estén alineados. A dicho ángulo de no alineación se conoce como ángulo de ataque.

Muchos cuerpos tridimensionales tienen por lo menos un plano de simetría. Si el vector de velocidad del flujo de aproximación es paralelo a este plano de simetría, la fuerza resultante sobre el cuerpo está en el plano de simetría, y por tanto, tiene solo dos componentes que siguen siendo la resistencia y la sustentación. Si el flujo es completamente asimétrico, ya sea porque el cuerpo tridimensional no tiene plano de simetría o porque el flujo de aproximación no es paralelo al plano de simetría, la fuerza resultante tiene tres componentes, llamadas resistencia, sustentación y fuerza lateral. (ver fig. No. 4)

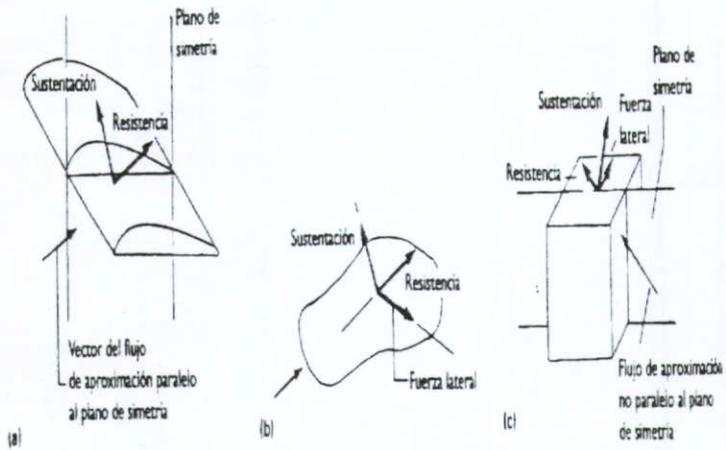


Fig. No.4 Componentes de la fuerza en cuerpos distintos.

La resistencia y la sustentación son las resultantes de las fuerzas de presión y las debidas a esfuerzos cortantes sobre la superficie del cuerpo<sup>7</sup>. El significado de un perfil aerodinámico es un cuerpo bidimensional largo y delgado, que se diseñó para producir gran sustentación y poca resistencia. De donde se obtiene que la fuerza de sustentación es ocasionada sobre todo por la presión, mientras que la fuerza de resistencia es causada principalmente por el esfuerzo cortante. (Ver fig. No. 5)

<sup>7</sup> - VENNARD, John K./ STREET, Robert L., Elementos de Mecánica de Fluidos, Versión SI, Cía. Editorial Continental S.A. de C.V. México p. 731

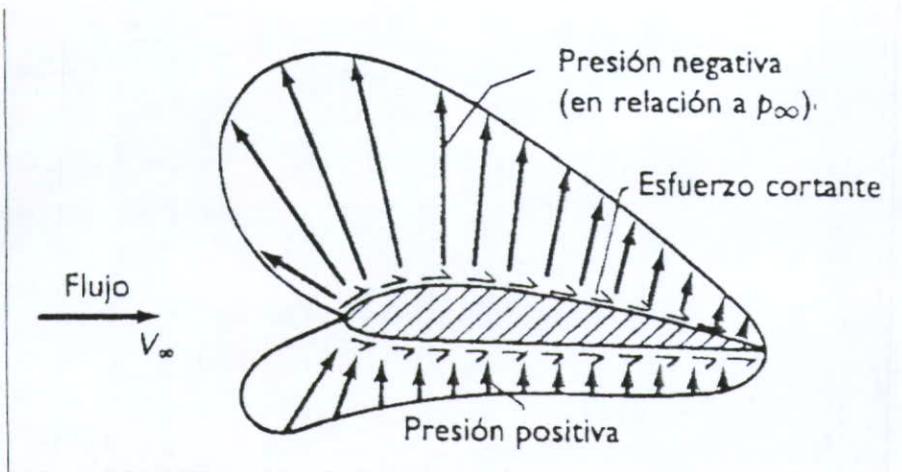


Fig. No. 5 Distribución de presiones y esfuerzos cortantes sobre un perfil aerodinámico.

Con frecuencia el interés último son las fuerzas de resistencia y sustentación en lugar de las distribuciones de esfuerzos y presiones, por lo que los resultados experimentales y analíticos se presentan directamente como resistencia y sustentación. Así pues los coeficientes adimensionales de resistencia y sustentación se definen como:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S} \quad (1.11)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S} \quad (1.12)$$

Donde  $V_\infty$  es la velocidad del fluido relativa al objeto y  $S$  un área de referencia,  $D$  la resistencia y  $L$  la sustentación. De acuerdo con el análisis dimensional puro, el área de referencia se debe tomar como el cuadrado de una sola longitud de referencia. En la práctica se emplean varias definiciones para el área, las dos más comunes son el área frontal (la que se vería al mirar el cuerpo desde la dirección del flujo que se aproxima) y el área proyectada (la que se vería observando al cuerpo desde arriba). (Ver fig. No. 6)

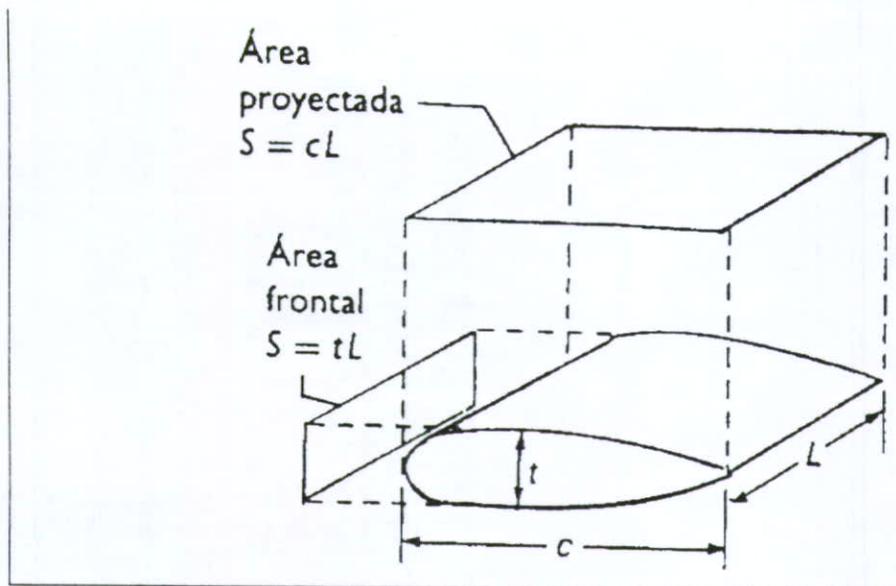


Fig. No. 6 Definición de las áreas frontal y Proyectada

Para cuerpos bidimensionales, el área se basa en un ancho unitario ( $L=1$ ). A partir del análisis dimensional, los coeficientes de resistencia y sustentación para una forma dada en flujo estacionario son funciones de los parámetros adimensionales de las variables independientes fundamentales.

En la mayoría de los flujos de interés práctico, los efectos de la tensión superficial (número de Weber) son irrelevantes. En casi todos los casos (excepto para perfiles hidrodinámicos que operan cerca de una superficie libre), los efectos de ondas gravitatorias también son irrelevantes, y en virtud de que se habla de flujo incompresible ( $M < 0.3$ ), los números de Mach son irrelevantes.

## 1. Resistencia.

Es importante recordar que la velocidad de caída de un objeto en el vacío es independiente de su peso. Sin embargo en condiciones normales, los objetos más pesados experimentan una mayor aceleración en virtud de que su relación neta fuerza-masa (el peso menos la resistencia dividida entre la masa) es mayor que para un objeto más ligero. La historia comenta que los antiguos griegos creían que debía ejercerse una fuerza sobre un cuerpo para moverlo a una velocidad constante<sup>8</sup>. No fue sino hasta alrededor de 1670, cuando Isaac Newton se percató de que los cuerpos en movimiento experimentan una fuerza de resistencia y dedujo que para cambiar la velocidad de los cuerpos es necesaria una fuerza

Es entonces la resistencia proveniente de la presión la que se conoce como resistencia de forma, ya que depende de la forma del cuerpo. La resistencia debida al esfuerzo cortante se conoce como resistencia de fricción. Esta depende básicamente de la cantidad de superficie en contacto con el fluido. En la mayoría de los cuerpos la resistencia es una combinación de forma y de fricción.

Si se considera como ejemplo una placa delgada, ésta tiene un área despreciable perpendicular al flujo y no experimenta resistencia de forma. La velocidad del fluido en la superficie de la placa es cero y aumenta hasta la velocidad de la corriente libre en una distancia corta desde la placa. En la superficie de la placa el gradiente de velocidad no es cero, y en consecuencia ahí existe un esfuerzo cortante y la placa experimenta resistencia de fricción.

La figura No. 7 muestra el coeficiente de resistencia de una placa plana alineada con el flujo como una función del número de Reynolds, la rugosidad de la placa y el estado del flujo (laminar o turbulento). El área de referencia es el área proyectada.

---

<sup>8</sup> - STREETER, Victor L./ WYLIE, E. Benjamin, Mecánica de los Fluidos, 8a. ed. (3a. en español); Ed. Mc Graw-Hill, p. 163

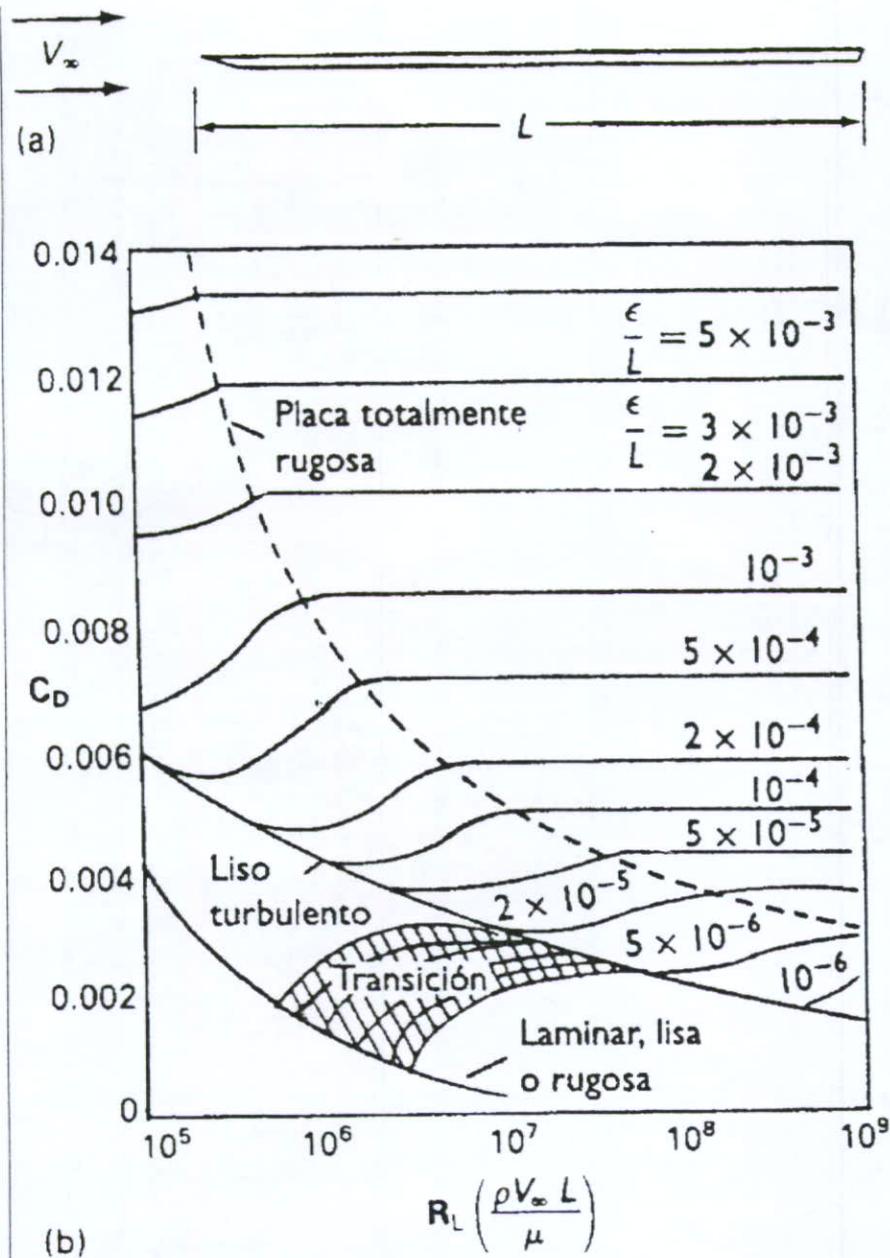


Fig. No. 7 Coeficiente de resistencia de una placa alineada con el flujo contra el número de Reynolds.

El flujo cerca de la superficie de la placa puede ser laminar o turbulento. El estado de flujo que exista depende de la longitud de la placa (número de Reynolds), su rugosidad y el nivel de turbulencia en el flujo de la corriente libre. La rugosidad de la superficie y la turbulencia de la corriente libre dan lugar a que la transición a la turbulencia ocurra a menores números de Reynolds que sobre placas lisas en una corriente en reposo. El coeficiente de resistencia para el flujo laminar es bastante pequeño, mientras que para el flujo turbulento es mucho mayor debido al incremento en el esfuerzo cortante.

Si se supone ahora que la placa se gira de manera tal que quede perpendicular al flujo de aproximación, se obtiene un patrón de flujo completamente diferente; para fluir alrededor de la placa el fluido debe dar vuelta como se muestra en la figura No. 8. En las orillas de la placa el fluido es incapaz de dar vuelta para fluir sobre la parte posterior, por lo que las líneas de corriente se separan en la esquina. La región detrás de la placa se denomina estela, y contiene un fluido a presión y velocidad bajas.

Las fuerzas generadas por los esfuerzos cortantes en la superficie de la placa son perpendiculares al flujo que se aproxima y no contribuyen a la resistencia. La resistencia sobre una placa normal es causada solamente por la presión, y todo es resistencia de forma. En la figura No. 8 se muestra una distribución de presiones típica para el flujo sobre una placa normal bidimensional. En el centro de la placa (el punto de estancamiento), la presión es igual a la presión total de la corriente libre, ya que la velocidad es cero. Cerca de las orillas de la placa, la presión disminuye rápidamente hasta un valor muy por debajo de la presión de la corriente libre. La presión en la parte posterior de la placa es constante e igual a la presión en la orilla.

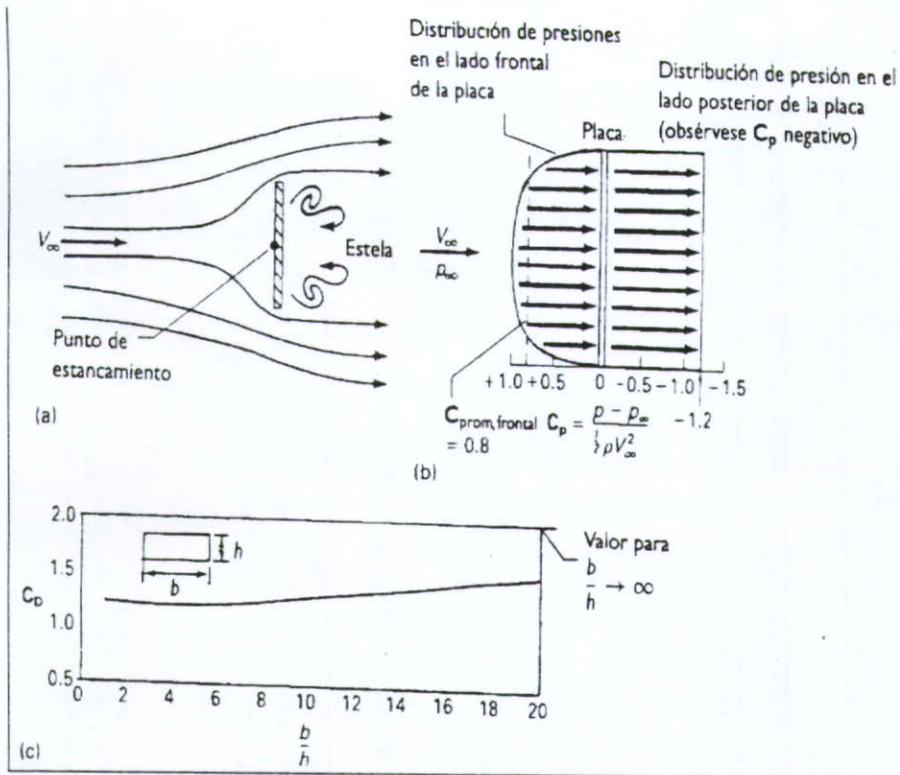


Fig. No. 8 Flujo sobre una placa plana normal al flujo (a) representación esquemática del flujo; (b) distribución de presiones en la placa; (c) efecto del ancho  $C_D$  para una placa plana finita.

La naturaleza de la resistencia sobre placas planas alineadas con el flujo o normales a él es relativamente fácil de entender, ya que sólo se presenta un tipo de resistencia en cada caso. Si se tratan ahora algunas formas simples para los cuales ambos tipos de resistencia se presentan. En la figura No. 9 inciso (a) se ilustra el flujo sobre un cuerpo liso de sección transversal circular. Si el cuerpo es bidimensional, es un cilindro; si es de simetría axial, es una esfera. Tanto el cilindro como la esfera tienen cantidades iguales de área paralela y perpendicular al flujo y experimentan tanto resistencia de forma como de fricción. En la figura No. 9 inciso (b) se representan los coeficientes de resistencia para

esferas y cilindros lisos. Para ambos cuerpos el número de Reynolds se basa en el diámetro y el coeficiente de resistencia se basa en el área frontal<sup>9</sup>. En consecuencia:

$$S = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (1.13)$$

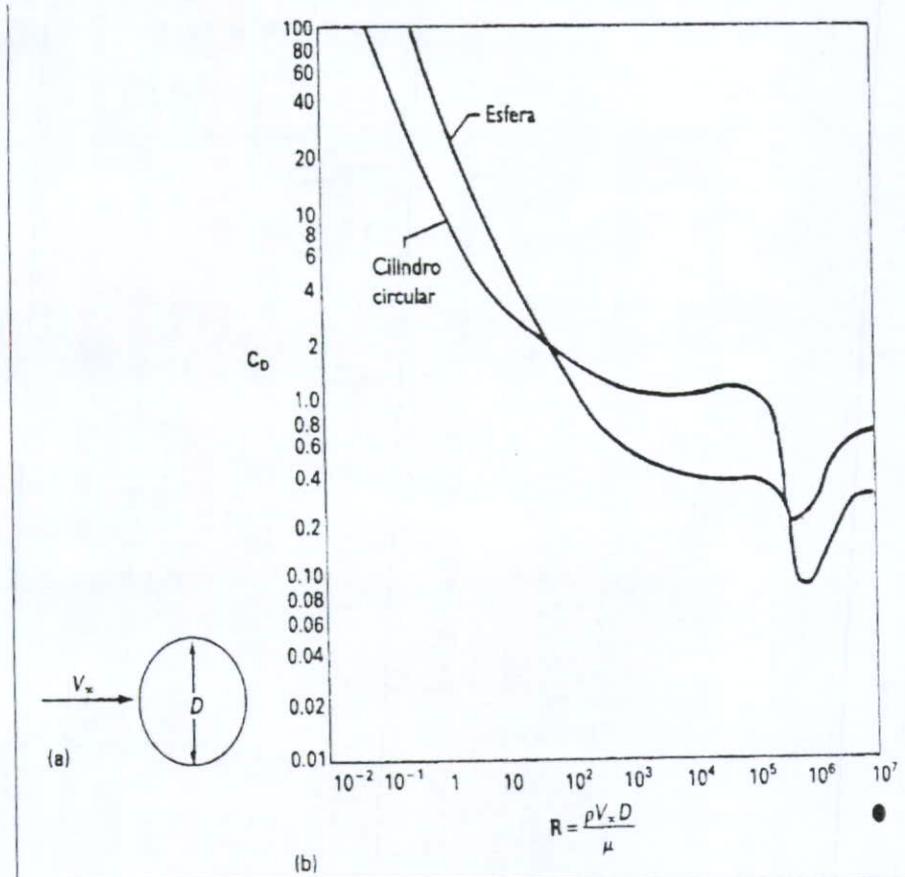


Fig. No. 9 Resistencia de un cuerpo liso de sección transversal circular: (a) representación esquemática; (b) coeficientes de resistencia función del número de Reynolds.

<sup>9</sup> - GERHART, Philip/ GROSS, Richard/ HOCHSTEIN, John, Fundamentos de Mecánica de Fluidos, 2a. ed.; Ed Addison-Wesley Iberoamericana, p. 675

Para trabajo numérico White ha sugerido las siguientes curvas de ajuste<sup>10</sup> :

$$C_{D,cilindro} \approx 1.0 + 10.0(R)^{-0.67}, R < 2 \times 10^5,$$
$$C_{D,esfera} \approx \frac{24}{R} + \frac{6}{1 + \sqrt{R}} + 0.4, R < 2 \times 10^5, \quad (1.14)$$

(1.15)

La figura No. 10 ilustra los efectos de la rugosidad de la superficie sobre la resistencia de un cilindro. La figura se limita a aquella parte del intervalo de números de Reynolds donde ocurre la inflexión en el coeficiente de resistencia.

Obsérvese que las superficies ligera y moderadamente rugosas causan que la inflexión ocurra a valores menores de  $R$ , y dan como resultado que a  $R$  elevados el coeficiente de resistencia sea de alrededor de un 50% mayor que para una superficie lisa.

---

<sup>10</sup> - VENNARD, John K./ STREET, Robert L., Elementos de Mecánica de Fluidos, Versión SI, Cia. Editorial Continental S.A. de C.V. México p. 731

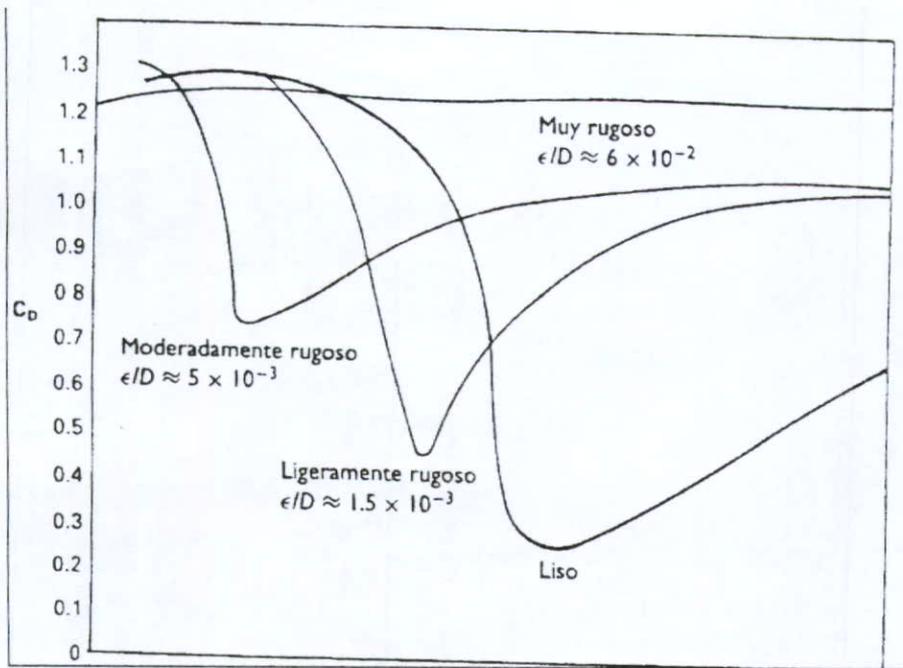


Fig. No. 10 Efectos de la rugosidad de la superficie sobre la resistencia de un cilindro.

Como el número de Reynolds es la relación de una fuerza de inercia a una fuerza viscosa en el fluido, se podría suponer, de manera razonable, que el flujo a números de Reynolds elevados es aproximadamente sin viscosidad<sup>11</sup>.

Si se desprecian las fuerzas viscosas, se podrían calcular los patrones de las líneas de corriente y la distribución de presiones para el flujo sobre cuerpos simples. Tanto el patrón del flujo como la distribución de presiones no simétricos en relación con el plano medio del cilindro.

Considérese el cálculo de la resistencia de forma para la distribución de presiones que se muestra en la figura No. 11:

<sup>11</sup> - SHAMES, Irving H. Mecánica de Fluidos, 3a. ed; Ed. Mc Graw-Hill p. 353

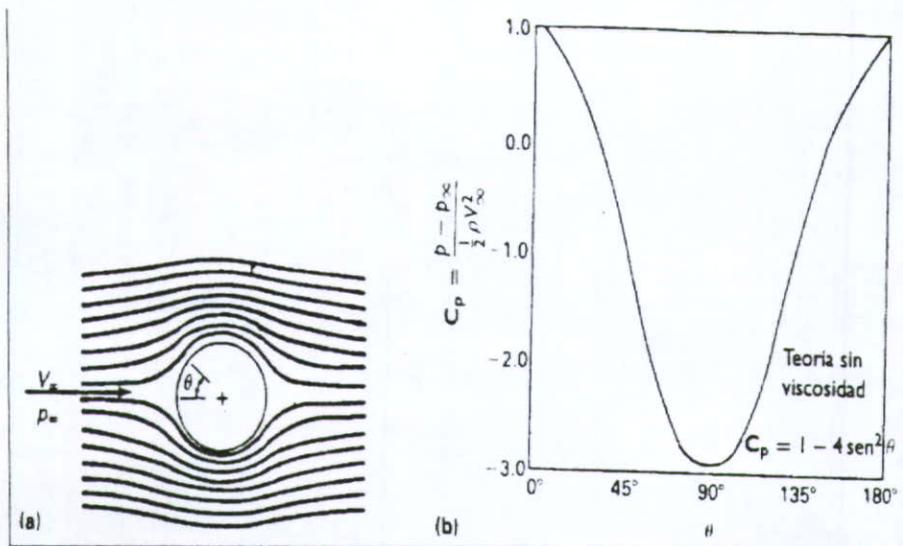


Fig. No. 11 Patrón de líneas de corriente y distribución de presiones calculadas para un flujo no viscoso sobre un cilindro.

La distribución de presiones es simétrica, por lo que cada elemento de superficie sobre el frente del cilindro que experimenta un empujón en la dirección del flujo se equilibra por un elemento correspondiente en la parte superior, que experimenta un empujón igual pero opuesto a la dirección del flujo. Todos estos elementos ocurren en pares y, en consecuencia, la fuerza de resistencia neta sería cero. La predicción de una resistencia cero para un fluido no viscoso se puede extender inclusive a la placa plana normal.

En la figura No. 12 se muestran las líneas de corriente para el flujo sobre una placa plana normal, la cual se calculó empleando la suposición del fluido no viscoso; la distribución de presiones predicha sobre la placa es la misma en el frente y en la parte posterior, por lo que no se tendría resistencia

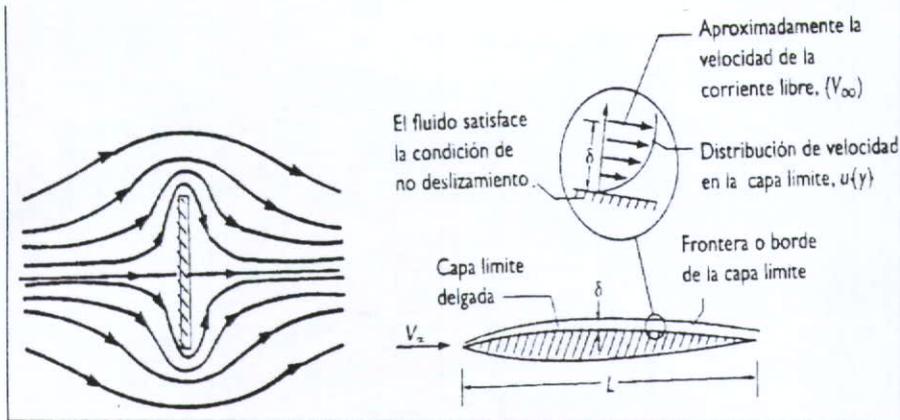


Fig. No. 12 Líneas de corriente para un flujo no viscoso sobre una placa plana normal. En la figura se muestra la capa límite viscosa delgada en un cuerpo fuselado, en un flujo a altos números de Reynolds.

En 1904, L. Prandtl introdujo la hipótesis de capa límite, que explica como se originan la resistencia de forma y de fricción en un flujo que tiene un número de Reynolds elevado<sup>12</sup>. Para un flujo sobre un cuerpo delgado y largo, tal como la placa plana paralela o perfil aerodinámico, Prandtl se percató de que sin importar que tan pequeña era la viscosidad, el fluido debería satisfacer la condición de no deslizamiento en la superficie. En consecuencia, la velocidad del fluido debe aumentar desde cero en la superficie hasta un valor que es del orden de magnitud de la velocidad de la corriente libre en una corta distancia. Esta región donde la velocidad aumenta desde cero hasta el valor de la corriente libre se denomina capa límite. Prandtl observó que para números de Reynolds altos la capa límite es muy delgada; de hecho demostró que<sup>13</sup>:

$$\frac{\delta}{L} \sim \frac{\sqrt{\nu}}{\sqrt{V_{\infty} L}} = \frac{1}{\sqrt{R_L}} \quad (1.16)$$

<sup>12</sup> - GERHART, Philip/ GROSS, Richard/ HOCHSTEIN, John, Fundamentos de Mecánica de Fluidos, 2a. ed.; Ed Addison-Wesley Iberoamericana, p. 675

<sup>13</sup> - STREETER, Víctor L./ WYLIE, E. Benjamin, Mecánica de los Fluidos, 8a. ed. (3a. en español); Ed. Mc Graw-Hill, p. 262

Donde  $\delta$  representa la capa límite delgada,  $L$  la longitud del perfil,  $V_\infty$  la velocidad del flujo,  $R_L$  la resistencia. Aún cuando la viscosidad sea pequeña, en el fluido de la capa límite se presentan esfuerzos cortantes significativos.

Mientras la capa límite sea delgada, su presencia tiene un efecto pequeño sobre la distribución de presiones o el patrón de flujo cerca del cuerpo. Para la placa plana o el perfil aerodinámico delgado, las formas de las líneas de corriente permanecen esencialmente sin cambio debido a la capa límite.

Como la capa límite es una región donde el fluido experimenta una deformación debida al esfuerzo cortante, dependiendo de la magnitud del número de Reynolds, el flujo puede ser laminar o turbulento.

El flujo en la capa límite cerca del borde de ataque de la placa siempre es laminar, ya que el número de Reynolds (local) es pequeño; si la placa es lo suficientemente larga, ocurre la transición hacia la turbulencia y el flujo es turbulento a lo largo de la porción corriente abajo de la placa.

Si el flujo se perturba por la rugosidad de la superficie o turbulencia en la corriente fuera de la capa límite, la transición ocurre más cerca del borde de ataque. Debido a que en el flujo turbulento se tiene una mejor mezcla, la capa límite tiene esfuerzos cortantes mayores que la capa límite laminar. Así mismo, las superficies rugosas experimentan un mayor esfuerzo que las lisas.

Considérese la capa límite en un cilindro circular, la diferencia fundamental entre los flujos en la placa plana y el cilindro es que la forma de este último causa un cambio de presión en el flujo (Ver fig. No. 13):

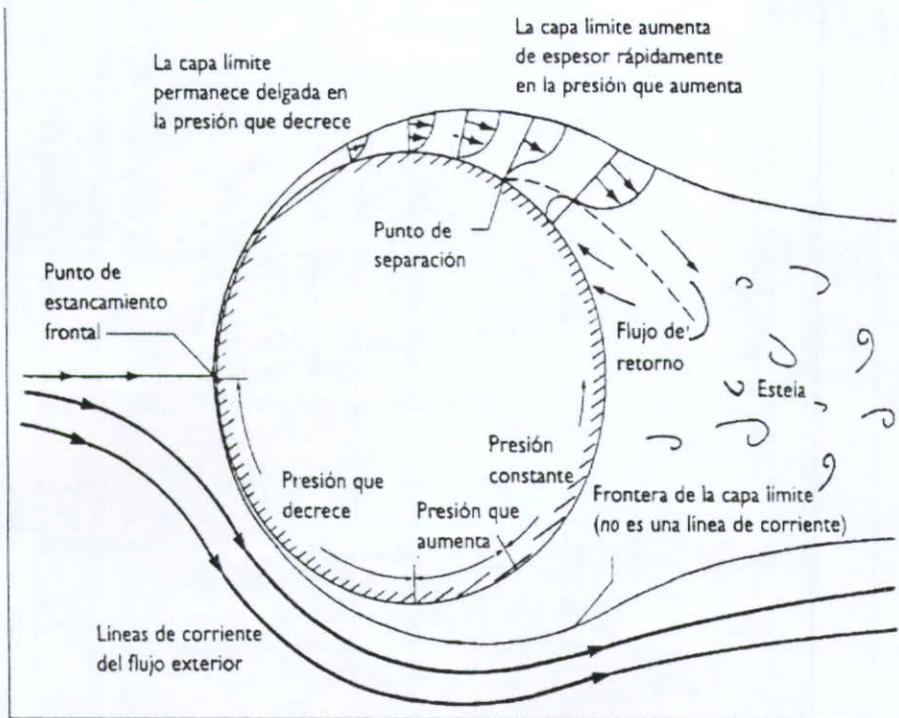


Fig. No. 13 Representación de la condición de la capa límite en un cilindro circular ante cierto flujo.

La distribución de presiones tiene un profundo efecto sobre la capa límite. El flujo fuera de ella es determinado por un balance entre la fuerza de presión y la cantidad de movimiento del fluido. En el frente del cilindro la cantidad de movimiento del fluido aumenta y la presión disminuye; mientras que en el lado posterior, el fluido intercambia cantidad de movimiento para aumentar la presión. Para la capa límite, el flujo está determinado por un balance entre la cantidad de movimiento y la presión más fuerzas viscosas. Como la velocidad del fluido en la capa límite es menor, tiene menos cantidad de movimiento que el fluido fuera de ella. Esta situación no es demasiado seria en el lado frontal del cilindro, donde la presión que disminuye ayuda a empujar el fluido a lo largo de la capa límite. En la parte posterior del cilindro la situación es diferente, a medida que la presión empieza a aumentar, el fluido debe intercambiar cantidad de movimiento por

presión. Como la capa límite es deficiente en cantidad de movimiento, no puede penetrar mucho en la presión que aumenta. La presión ocasiona que el fluido se detenga en la capa límite y eventualmente, cambie su dirección hasta el sentido opuesto. La capa límite se separa de la superficie del cilindro y se forma una amplia estela detrás del cilindro. La capa límite que se separa empuja las líneas de corriente de flujo hacia afuera y altera el patrón total de flujo y la distribución de presiones. La presión en la parte posterior del cilindro, en la estela, es baja y aproximadamente constante. La presión en el frente es alta y, por eso, sobre el cilindro actúa una fuerza de presión neta (resistencia de forma). El esfuerzo cortante sobre la superficie del cilindro da lugar a una resistencia de fricción. A números de Reynolds mayores de alrededor de  $10^3$ , la resistencia de forma es responsable de aproximadamente el 95% de la resistencia total, por lo que el coeficiente de resistencia se hace independiente del número de Reynolds, excepto cerca de la inflexión a números de Reynolds cercanos a  $5 \times 10^5$ .

La disminución brusca en el coeficiente de resistencia y el valor menor que después resulta de  $C_D$  son el resultado de la transición de flujo laminar a turbulento en la capa límite<sup>14</sup>. Para entender los efectos de la turbulencia en el flujo del cilindro, se debe recordar que una capa límite turbulenta contiene más cantidad de movimiento que una laminar, ya que el perfil de velocidad es más desplegado o abierto. Como la capa límite turbulenta contiene más cantidad de movimiento, puede penetrar más en la presión que aumenta en la parte posterior del cilindro y la separación se retrasa, la estela es más pequeña y la presión en ella es mayor. La figura No. 14 muestra distribuciones de presiones en cilindros con capas límite laminar y turbulenta.

---

<sup>14</sup> - VENNARD, John K./ STREET, Robert L., Elementos de Mecánica de Fluidos, Versión SI, Cia. Editorial Continental S.A. de C.V. México p. 727

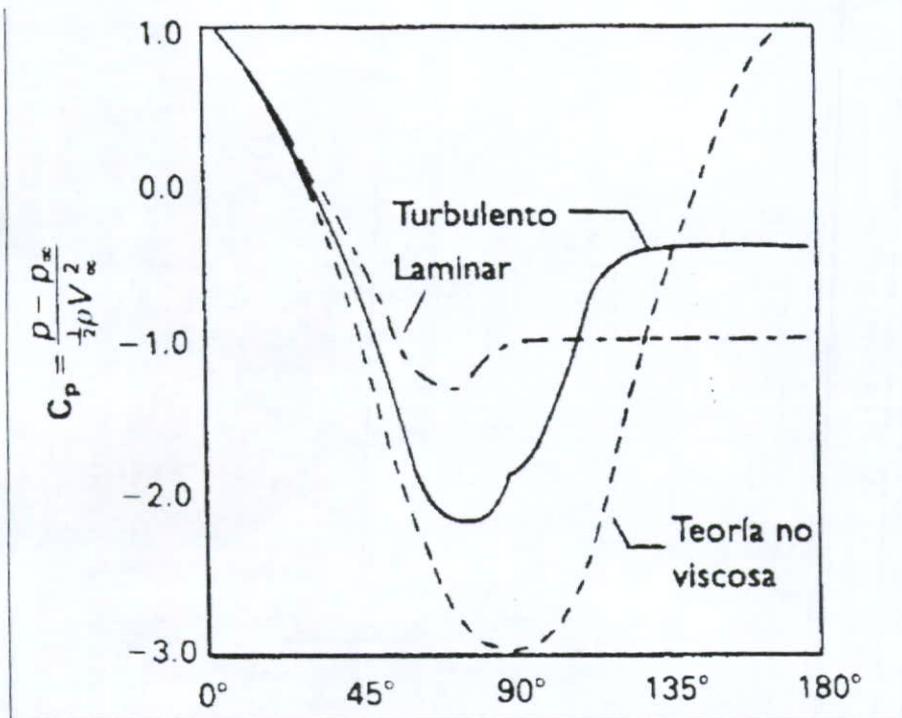


Fig. No. 14 Distribución de presiones en la superficie de un cilindro para las capas límite laminar y turbulenta.

La presión promedio mayor atrás del cilindro, con una capa límite turbulenta, da como resultado una resistencia de forma menor y un coeficiente de resistencia también menor, aunque la resistencia de fricción de la capa límite turbulenta es mayor que la correspondiente a la capa laminar.

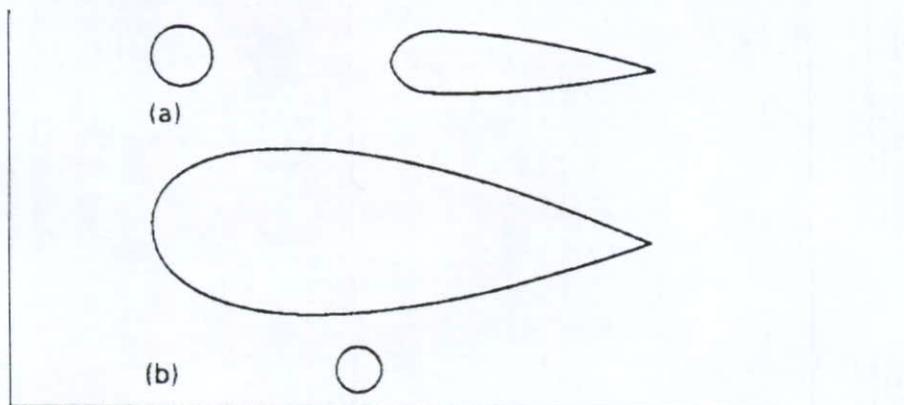
Con base en el entendimiento cualitativo de la resistencia se pueden diseñar formas de poca resistencia, teniendo en mente dos principios importantes:

a) Si el cuerpo es largo y delgado, tal como la placa plana paralela o un perfil aerodinámico, la resistencia está causada fundamentalmente por la fricción. Esta resistencia se puede reducir manteniendo el flujo laminar hasta donde sea posible. Esta

condición comprende superficies lisas y, si el cuerpo tiene espesor (como el perfil), significa elegir la forma que retrase la transición hasta donde sea posible.

b) Si el cuerpo es romo, la resistencia (a un número de Reynolds alto) es básicamente una resistencia de forma. Esta resistencia se puede reducir retrasando la separación hasta donde sea posible.

Una manera de retrasar la separación de la capa límite en un cuerpo grueso, es promover la transición a una capa límite turbulenta. Un método mejor es mediante el fuselado o perfilado del cuerpo, esto es, alargar la porción posterior del cuerpo. Se desprende que la separación de la capa límite depende de la velocidad de aumento en la presión; es decir, del gradiente de presión  $dp/dx$  en donde  $x$  es la distancia a lo largo de la superficie. La figura No. 15a muestra un cilindro circular y un cuerpo fuselado con la misma área frontal. El cuerpo fuselado tendrá un coeficiente de resistencia de aproximadamente un quinto del correspondiente al cilindro. Alternativamente la figura No. 15b muestra un cilindro y un cuerpo fuselado que tienen igual resistencia para una velocidad de flujo determinada.



Fig's. No. 15 Ilustración de los efectos del fuselado de un cuerpo sobre la resistencia a altos números de Reynolds: (a) cilindro y cuerpo fuselado con la misma área frontal; CD, cilindro es aproximadamente 5 CD fuselado.; b) cilindro y cuerpo fuselado con igual fuerza de resistencia a una velocidad de flujo dada.

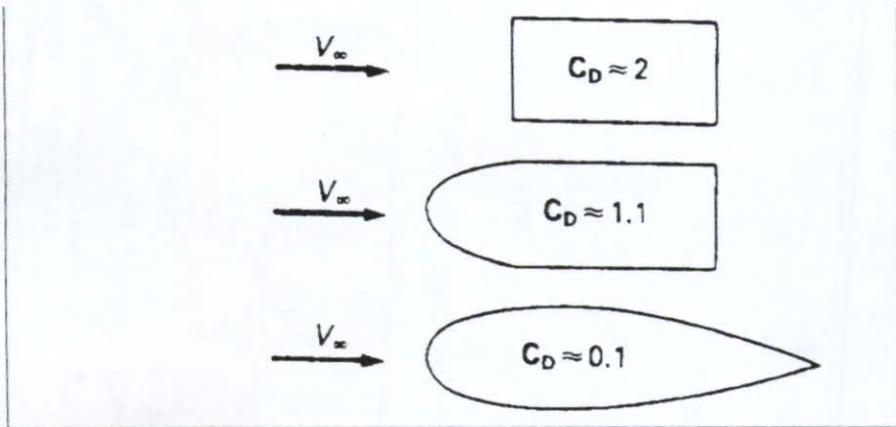


Fig. No. 16 Efecto del fuselado de un cuerpo sobre la reducción de la resistencia. Los coeficientes de resistencia se basan en el área frontal. Todos los cuerpos mostrados son bidimensionales.

Si la parte frontal de un cuerpo es plana, su redondeo también puede reducir la resistencia. La figura No. 16 ilustra los beneficios de redondear la parte frontal y fuselar en punta la parte posterior. La porción frontal de un cuerpo puede ser bastante redondeada o roma con un gradiente de presión grande (negativo), ya que no ocurre la separación cuando la presión disminuye. El cambio de presión en la parte posterior (que aumenta) es lo que se debe lograr de manera gradual. Existe un límite para la cantidad de reducción de la resistencia que se puede lograr al fuselar el cuerpo. A medida que el cuerpo se alarga, la resistencia de fricción aumenta, ya que se tiene más superficie en contacto con el flujo. La resistencia mínima sobre el cuerpo la proporciona el balance adecuado entre la resistencia de fricción y la de forma. (Ver fig. 17)

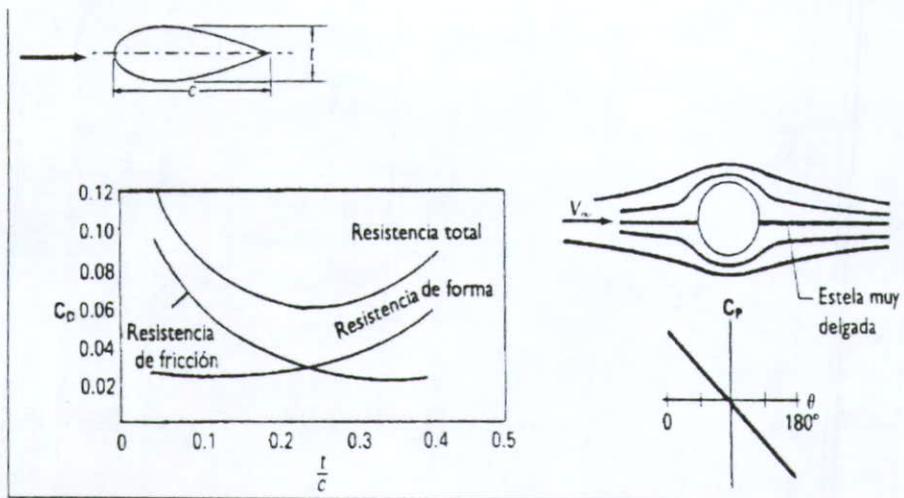


Fig. No. 17 Relación del fuselado con las resistencias de fricción y de forma.

Generalmente los perfiles son delgados, con una relación espesor a longitud menor que  $0.2^{15}$ . La línea que une la parte posterior con la frontal se denomina línea de la cuerda. La longitud de esta línea, llamada cuerda, es la medida básica del tamaño del perfil, la cual sirve de referencia para las otras dimensiones del perfil. La línea a la mitad entre las superficies superior e inferior se denomina línea media o línea de curvatura. Para un perfil simétrico, las líneas de cuerda y de curvatura son idénticas. Un perfil con una línea de curvatura arqueada es asimétrico y se dice que está curvado o arqueado. El arco de un perfil ( $h$ ) en cualquier punto es la distancia entre la línea de cuerda y la de curvatura.

El arco y el espesor ( $t$ ) de un perfil se miden perpendiculares a la línea de cuerda. Cuando un perfil está inmerso en un flujo, el ángulo entre el vector de la velocidad de flujo de aproximación y la línea de cuerda se denomina ángulo de ataque. (Ver fig. No. 18)

<sup>15</sup> - GERHART, Philip/ GROSS, Richard/ HOCHSTEIN, John, Fundamentos de Mecánica de Fluidos, 2a. ed.; Ed Addison-Wesley Iberoamericana, p. 675

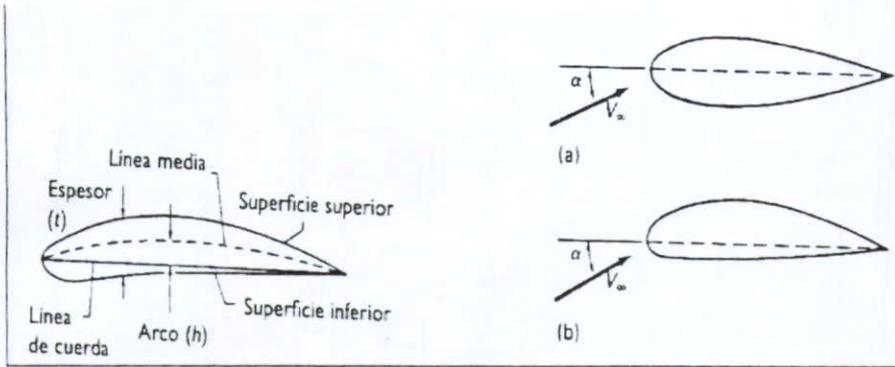


Fig. No. 18 Forma típica de un perfil. Perfiles aerodinámicos bidimensionales: (a) simétrico, (b) curvado.

## II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS AERODINÁMICAS.

### A. Diseño Preliminar.

Los túneles de viento son herramientas con formas de ductos o pasajes en los cuales es producido un flujo, usualmente por un ventilador , y dicho flujo se hace pasar sobre objetos tales como aviones, máquinas, alas, cohetes o modelos de estos objetos. El objeto es estacionario y es puesto en la sección de trabajo, a la que se conectan instrumentos que pueden medir el flujo del aire, las fuerzas aerodinámicas que sobre el objeto ocurren. De la información obtenida en estas pruebas, los ingenieros pueden determinar el comportamiento de los modelos estudiados bajo situaciones reales, así también es útil para determinar el desempeño. Hoy en día ningún avión, nave espacial o vehículo es lanzado a pruebas reales hasta que su diseño y componentes han sido satisfactoriamente probados en un túnel de viento. En la interpretación de los resultados obtenidos en el túnel de viento es importante considerar el efecto del número de Reynolds.

El requerimiento básico de un túnel de viento para pruebas aerodinámicas es una región de flujo uniforme, con baja turbulencia en donde el modelo pueda ser probado. Esta sección en lo sucesivo, será referida como área de trabajo. Remolinos, así como turbulencias, deberán mantenerse tan bajos como sea posible en esta sección. El arreglo básico consiste de un ventilador que extraerá aire a través de la sección de trabajo. Usualmente se cuenta con una tobera aguas arriba de la sección de trabajo y con un difusor aguas abajo de la misma.

La sección de trabajo regularmente es de sección transversal rectangular, con esquinas fileteadas para evitar la acumulación de aire muerto en dichas esquinas. La presión estática de la sección de trabajo es la atmosférica.

La función del difusor es de disminuir el aire a la salida del túnel con las menores pérdidas posibles de energía, mientras mantiene una máxima uniformidad de flujo. Resultados experimentales muestran que deben ser usados ángulos pequeños en el difusor, de

aproximadamente 5 grados de pendiente<sup>16</sup>, haciéndose éste del largo necesario para cumplir con tal requisito. Puede haber más de una parte en el túnel con difusión.

El túnel de viento también deberá contar con un cierto número de rejillas, que son insertadas a la entrada del túnel para incrementar la uniformidad del flujo y reducir las turbulencias, estas rejillas deberán tener cierta profundidad paralela al flujo, simulando la formación que posee un panal. Para una cierta presión dada, es menos efectivo utilizar una sola rejilla de construcción robusta que nos provoque una considerable caída de presión, que utilizar un conjunto de rejillas finas uniformemente espaciadas.

La función de la contracción es de incrementar la velocidad del flujo a través de la sección de trabajo; pero, a la vez, también comprime las líneas de corriente y suaviza las fluctuaciones en la velocidad. Por esta razón es mejor disminuir el flujo que sale del ventilador y después incrementarlo a través de una contracción. Encontramos que para adaptar una adecuada contracción, el coeficiente de la entrada y salida de la misma entre más alto sea, será mejor, pero en todo caso deberá ajustarse para manejar velocidades de no más de 10 m/s aproximadamente en las zonas de baja velocidad del túnel. La forma de la contracción deberá ser tal que el área decrezca constantemente, sin puntos estacionarios; por ende, la velocidad incrementará a su vez constantemente también. El coeficiente de velocidades de entrada y salida deberá ser el mismo que el coeficiente de contracción<sup>17</sup>.

El ventilador deberá ser colocado tan lejos como sea posible de ambos lados de la sección de trabajo para evitar cualquier posible turbulencia. Regularmente, el ventilador es colocado en un área donde la sección transversal sea de una y media a dos veces el área de sección transversal de la sección de trabajo<sup>18</sup>, ya que un ventilador pequeño es ineficiente, y tendría problemas de consumo de energía, y uno demasiado grande tiende a hacer vibrar las aspas y con eso modificar el flujo. El ventilador deberá ser tal que se pueda regular su velocidad para

---

<sup>16</sup> - CLANCY, L. J., Aerodynamics, Pitman Publishing 1975 p. 342

<sup>17</sup> - DOUGLASS, M. Considne, Manual de Instrumentación Aplicada, S.D. Ross Editores, Ed. CECSA, p. 227

<sup>18</sup> - CLANCY, L. J., Aerodynamics, Pitman Publishing 1975 p. 349

obtener una buena variación de la misma para distintas pruebas dentro del túnel. La velocidad máxima que el ventilador proporcione dentro del túnel, deberá ser tal que sea menos de la mitad de la velocidad del sonido, para evitar problemas de involucrar flujo compresible.

Finalmente es común instalar una malla protectora a la salida del túnel de viento, la cual deberá ser robusta, por si el modelo o alguna parte de sujeción del mismo es arrancada y expulsada con gran velocidad hacia el exterior.

En virtud de la imposibilidad que representa la construcción de un túnel de viento que alcance velocidades supersónicas por razones obvias de costo y magnitudes del mismo; el túnel de viento que se propone, será únicamente para hacer pruebas con velocidades subsónicas, tomando así nuestro fluido, el aire, para fines de cálculo y estudio, como un fluido incompresible.

Uno de los aspectos importantes en el diseño será considerar una longitud suficiente que nos proporcione un flujo uniforme a través del área de prueba, para evitar contar con turbulencias ajenas a la superficie misma del modelo.

Para provocar el flujo a través del túnel contaremos con un ventilador que será localizado en el extremo final de dicho túnel. Este ventilador succionará aire a través del túnel, el cual será de flujo abierto, es decir, no tendremos recirculación del aire. La decisión de que el ventilador succione el aire y no lo empuje es para mantener la zona de turbulencia provocada por las aspas lo más lejos posible de la sección de trabajo. De esta manera el flujo al ser succionado pasará uniformemente formándose la zona de turbulencia a la salida del túnel donde ya no es tan trascendente.

Para efectos de estudio se dividirá el túnel en tres secciones principales: tobera, área de trabajo y difusor, la función de la tobera es de incrementar la velocidad del flujo a la entrada, seguida de un área recta, que nos dará uniformidad de flujo en el área de trabajo, y nos evitará turbulencias; finalmente, el difusor se encargará de disminuir tanto la velocidad del flujo a la salida como la pérdida de potencia.

## B. Memoria de Cálculos.

### 1. Cálculo de dimensiones físicas.

Partiendo de que en la sección de trabajo  $d = 0.50$  m., encontramos que la literatura consultada nos recomienda que  $D$  tanto a la entrada como a la salida del túnel sea de 1.5 a 2 veces  $d$ . (ver Fig. No. 19). Donde  $d$  representa la longitud de la sección de trabajo, y  $D$  la longitud de las secciones de salida.

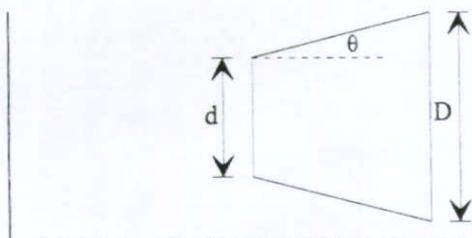


Fig. No. 19 Relación de dimensiones entre la sección de trabajo y las secciones de entrada y salida del túnel.

Así pues para la sección de trabajo:

$$Q = VA \quad (2.1)$$

$$V = 5 \text{ m/s (estimada de trabajo)}$$

$$Q = (5 \text{ m/s})(.25 \text{ m}^2) = 1.25 \text{ m}^3/\text{s} = 1,250 \text{ lt/seg}$$

$$Ma = U/a; \quad (2.2)$$

$$\text{donde } a = 360 \text{ m/s}$$

$$Ma = 5/360 = 0.0138$$

De igual forma para la tobera y el difusor, se tiene que la literatura consultada recomienda un ángulo de inclinación de entre  $5^\circ$  y  $15^\circ$  mínimo y máximo respectivamente:

Por lo tanto si  $\theta = 5^\circ$  para el difusor y  $D = 1.7d = 0.85$  m.:

$$L_{\text{difusor}} = \frac{\frac{.85}{2} - \frac{.5}{2}}{\tan 5^\circ} = 2.00 \text{ m.}$$

Similarmente para la tobera sólo que con un ángulo de 15°:

$$L_{\text{tobera}} = \frac{\frac{.85}{2} - \frac{.5}{2}}{\tan 15^\circ} = 1.00 \text{ m.}$$

a) Suponiendo Flujo Axial encontramos:

$$\alpha = 90^\circ$$

Si consideramos que:

$$m = \rho_1 c_{1m} A_1 = \rho_2 c_{2m} A_2 \quad (2.3)$$

Donde m representa el flujo másico, que por continuidad debe ser el mismo a la entrada y salida.

Y si tenemos que:

$$A_1 = A_2, \text{ y } \rho_1 = \rho_2$$

$$\text{entonces: } c_1 = c_{1m} = c_{2m}$$

$$u_1 = u_2 = \frac{\pi DN}{60} = u \quad (2.4)$$

b) Midiendo físicamente en el ventilador se tiene que:

$$\beta_1 = 25^\circ$$

$$\beta_2 = 55^\circ$$

$$D = .76 \text{ m}$$

Donde:  $c_1$  = velocidad absoluta de una partícula de fluido a la entrada de un alabe.

$u_1$  = velocidad periférica

$w_1$  = velocidad relativa a la entrada del alabe

$c_{1m}$  = componente meridional de la velocidad absoluta del fluido a la entrada

$c_{1u}$  = componente periférica de la velocidad absoluta del fluido a la entrada.

$\alpha$  = ángulo que forman las dos velocidades  $c_1$  y  $u_1$

$\beta_1$  = ángulo que forma  $w_1$  con  $(u_1)$

$\rho$  = densidad del medio.

Y lo mismo en el triángulo de salida, sustituyendo el subíndice 1 por el 2.

Así pues por ecuación de continuidad tenemos que el caudal es constante a todo lo largo del túnel, por lo que conociendo el área de entrada, podemos calcular la velocidad requerida:

$$V_e = \frac{Q}{A} = \frac{1.25 \text{ m}^3 / \text{s}}{\left(\frac{\pi}{4}\right)(.76)^2} = 2.75 \text{ m/s}$$

## 2. Cálculo de la potencia requerida para impulsar el ventilador.

La fig. No. 20 muestra los parámetros de consideración tomados en las aspas del ventilador.

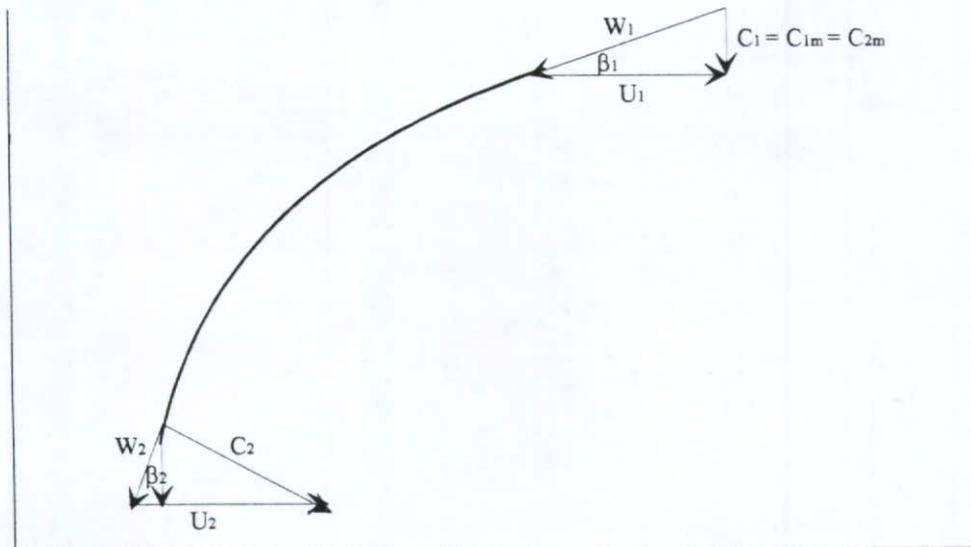


Fig. No. 20 Parámetros de las aspas del ventilador.

Procedimiento iterativo para encontrar la velocidad a la que debe girar el eje impulsor del ventilador:

- Suponer  $N$  (r.p.m. del motor)

- b) Sustituir para calcular  $u_1 = u_2 = u$   
 c)  $\beta_1$  medido, por lo tanto calcular  $c_1 = c_{1m} = c_{2m}$   
 d) Checar que  $c_1$  sea igual o mayor a 2.75 m/s

Suponiendo  $N = 200$  r.p.m.

$$u = \frac{\pi(.76m)(150)}{60} = 5.969$$

$$\tan \beta_1 = \frac{c_{1m}}{U_1} \therefore c_{1m} = (\tan \beta_1)u_1$$

$$= (\tan 25^\circ)(5.969 \text{ m/s}) = 2.783 \text{ m/s} = c_{1m} = c_{2m}$$

$$\tan \beta_2 = \frac{c_{2m}}{w_{2u}} \therefore w_{2u} = \frac{2.783 \text{ m/s}}{\tan 55^\circ} = 1.948 \text{ m/s}$$

$$c_{2u} = 5.969 - 1.948 = 4.021 \text{ m/s}$$

Después de varias iteraciones finalmente se encuentra que con 150 r.p.m. de giro del motor, logramos que la velocidad requerida para la sección de trabajo de 2.75 m/s se cumpla. Sin embargo para ser conservadores y tener potencia de respaldo, los cálculos de potencia requerida se efectuarán para 300 r.p.m.

Así pues el cálculo para determinar el motor eléctrico requerido es como se describe a continuación:

$$\Delta Pu = \rho(u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}) = \Delta P_{TOT}$$

$$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta P_{TOT} = \rho u_2 c_{2u} = \left(\frac{1.2 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{5.969 \text{ m}}{\text{s}}\right) \left(\frac{4.021 \text{ m}}{\text{s}}\right)$$

$$\Delta P_{TOT} = 28.801 \text{ Pa}$$

$$P_{accionamiento} = Q \Delta P_{TOT}$$

$$P_{accionamiento} = \left(\frac{1.25 \text{ m}^3}{\text{s}}\right) (28.801 \text{ Pa}) = 36.00 \text{ W} = 0.048 \text{ HP}$$

$$\text{Comercialmente} \approx \frac{1}{4} \text{ HP}$$

Donde:

- b) Sustituir para calcular  $u_1 = u_2 = u$
- c)  $\beta_1$  medido, por lo tanto calcular  $c_1 = c_{1m} = c_{2m}$
- d) Checar que  $c_1$  sea igual o mayor a 2.75 m/s

Suponiendo  $N = 200$  r.p.m.

$$u = \frac{\pi(0.76m)(150)}{60} = 5.969$$

$$\tan \beta_1 = \frac{c_{1m}}{U_1} \therefore c_{1m} = (\tan \beta_1)u_1$$

$$= (\tan 25^\circ)(5.969 \text{ m/s}) = 2.783 \text{ m/s} = c_{1m} = c_{2m}$$

$$\tan \beta_2 = \frac{c_{2m}}{w_{2u}} \therefore w_{2u} = \frac{2.783 \text{ m/s}}{\tan 55^\circ} = 1.948 \text{ m/s}$$

$$c_{2u} = 5.969 - 1.948 = 4.021 \text{ m/s}$$

Después de varias iteraciones finalmente se encuentra que con 150 r.p.m. de giro del motor, logramos que la velocidad requerida para la sección de trabajo de 2.75 m/s se cumpla. Sin embargo para ser conservadores y tener potencia de respaldo, los cálculos de potencia requerida se efectuarán para 300 r.p.m.

Así pues el cálculo para determinar el motor eléctrico requerido es como se describe a continuación:

$$\Delta P_u = \rho(u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}) = \Delta P_{TOT}$$

$$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta P_{TOT} = \rho u_2 c_{2u} = \left(\frac{1.2 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{5.969 \text{ m}}{\text{s}}\right) \left(\frac{4.021 \text{ m}}{\text{s}}\right)$$

$$\Delta P_{TOT} = 28.801 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{accionamiento}} = Q \Delta P_{TOT}$$

$$P_{\text{accionamiento}} = \left(\frac{1.25 \text{ m}^3}{\text{s}}\right) (28.801 \text{ Pa}) = 36.00 \text{ W} = 0.048 \text{ HP}$$

$$\text{Comercialmente} \approx \frac{1}{4} \text{ HP}$$

Donde:

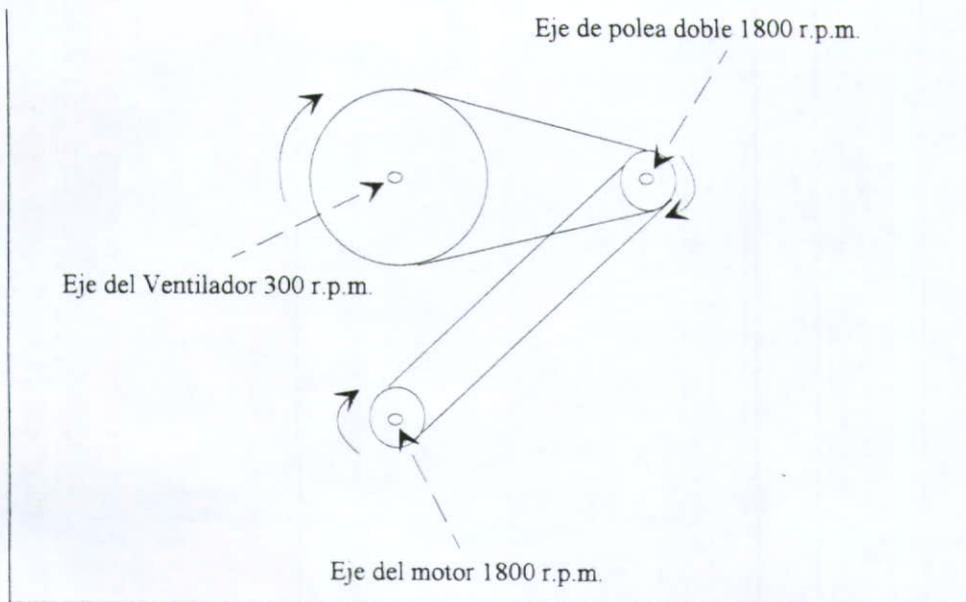


Fig. No. 21 Relación de velocidades.

### C. Desarrollo y construcción.

Primeramente se procedió a seleccionar el material del cual sería hecho dicho túnel. Entre las alternativas que se encontraron estaba el construirlo de hojas de madera, que representaba la ventaja de un menor peso en conjunto, o bien de lámina calibre número 20. Se optó por la segunda alternativa por las ventajas que este material presenta que a continuación se enumeran:

- a) Disponibilidad de herramientas de trabajo en el laboratorio de ingeniería de la Universidad Panamericana.
- b) El peso seguía siendo bajo y no representaba mayor problema su manejo.
- c) La lámina presenta la ventaja de poder ser soldada para efecto de agregar tramos o segmentos, así como la unión misma de elementos de sujeción, soporte y unión.
- d) Permite resanar fácilmente orificios hechos para fines experimentales.
- e) Una vez construido sólidamente, se elimina casi por completo la posibilidad de futuros desajustes en las uniones ocasionados por la vibración del dispositivo en operación.

Desventajas:

- a) Alta vibración en sus caras laterales.
- b) Costo superior al de hojas de madera.

Enseguida en base en los cálculos teóricos de las dimensiones adecuadas para el túnel se procedió a determinar los segmentos en que el túnel sería ensamblado. Para facilidad de desmontaje y reubicación del túnel dentro del laboratorio de la Universidad Panamericana, se decidió que lo más conveniente sería dejarlo en dos segmentos con longitud máxima de 2.5 metros. Sin embargo en virtud de la imposibilidad de cortar la sección de entrada y la de trabajo en una misma hoja, inicialmente se cortaron las láminas dividiendo las piezas de las tres secciones por separado.

Habiendo cortado las piezas, se procedió a puntear las hojas que formaban cada sección en específico, empleando puntos de soldadura mig. La soldadura mig representa la ventaja de insertar puntos de soldadura más precisos, consiguiendo con esto un mejor acabado, así como una menor corriente requerida reflejada en una menor aplicación de temperatura que podría provocar deformaciones en la lámina.

El siguiente paso fue unir la sección de entrada o tobera, con la sección de trabajo, que en conjunto nos darían una longitud manejable de 2.0 metros (ver fig. No. 22 ). El tipo de soldadura empleada fue de arco eléctrico, en este caso añadiendo cordones de soldadura más largos.

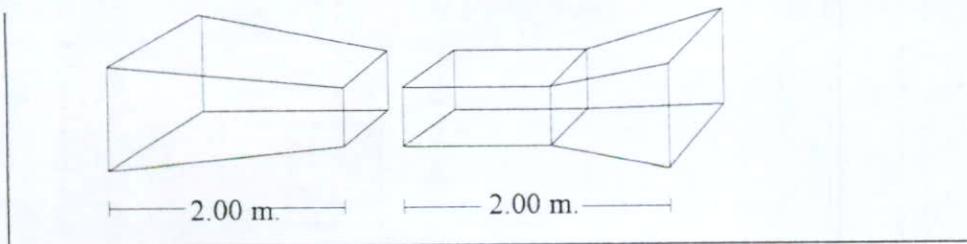


Fig. No. 22 Secciones del túnel de viento.

Sin embargo el problema persistía, aunque en menor proporción, por lo que fueron soldados tramos de solera a lo largo de los tres lados restantes de ambas secciones de entrada y salida. El problema de vibración fue eliminado casi en su totalidad.

El paso siguiente fue obtener el acabado final del túnel, por lo que se procedió a pintarlo empleando pistola neumática. A fin de eliminar el efecto de vibración restante, posteriormente a la pintura se añadieron 3 capas del liquido denominado “multicolor” que se añade a la superficie recién pintada dando aun mayor rigidez.

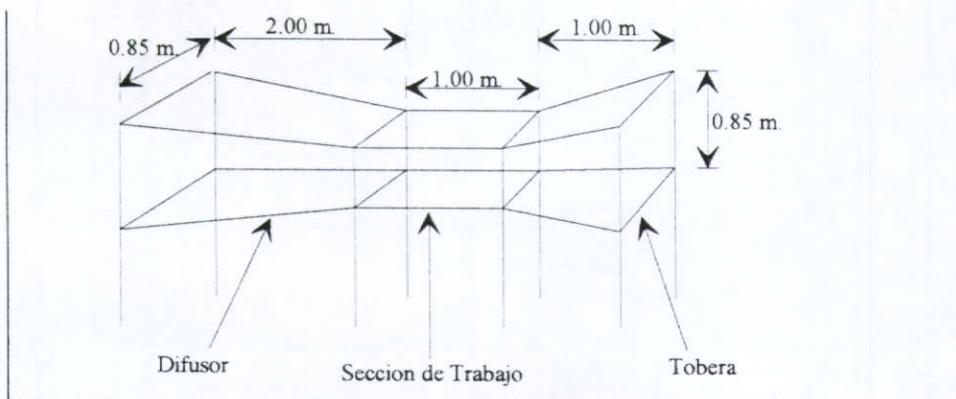


Fig. No. 23 Dimensiones físicas de las diferentes secciones.

La siguiente etapa consistió en fijar las mamparas de protección en la sección de entrada o tobera. Las mamparas fueron fabricadas con malla de tela de alambre y esta fue fijada a una estructura cuadrada hecha de lámina calibre número 20 de aproximadamente 2 cm de ancho. Estas mamparas se fijaron cada 25 cm., siendo tres en su totalidad. A su vez en la sección de salida o difusor fue fijada una mampara más para que cumpliera la función de “trampa” para evitar que si alguna de las piezas en estudio se desprendiera, fuera destruida por el ventilador, o bien en el caso contrario ésta dañara al ventilador. (ver fig. No. 24)

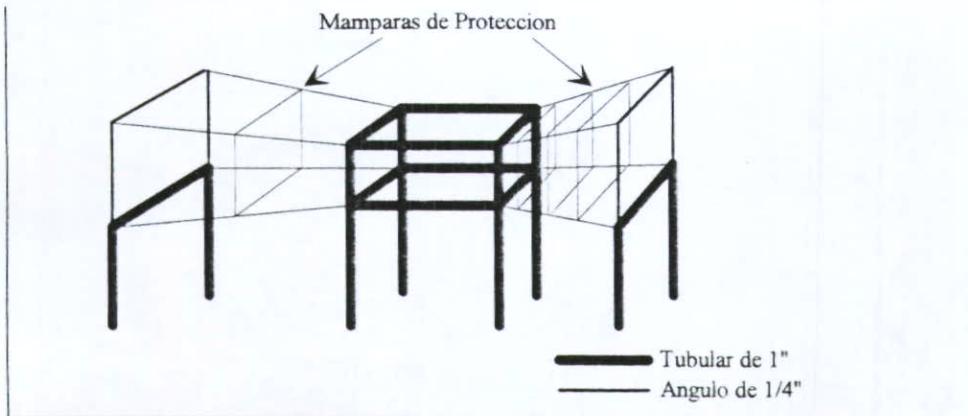


Fig. No. 24 Ubicación de la estructura de soporte y rigidez.

En la etapa siguiente se procedió a fabricar y ensamblar las piezas que formarían la parte generadora del flujo. Que se describe a continuación:

En base a las chumaceras, las aspas del ventilador, las poleas y el motor que ya se disponían, se procedió a diseñar la estructura de soporte. Esta consistió en dos barras hechas de ángulo de 2" de ancho por 1/4" de espesor que fueron fijadas a las paredes del túnel, a su vez transversalmente fueron soldadas dos barra hechas del mismo material, en las que serían fijadas las chumaceras que sostienen los ejes de las poleas, a fin de evitar vibración en estas barras de soporte, fueron soldados en ángulo con las patas de soporte de la sección de salida dos tramos más en cada extremo.

La parte de los ángulos que se encuentra fija a la cara lateral de la sección de salida, fué sujeta mediante tornillos con sus respectivas tuercas, evitando la soldadura en estos puntos para no provocar deformaciones en el material debido a las altas temperaturas empleadas en el proceso. (ver fig. No. 25)

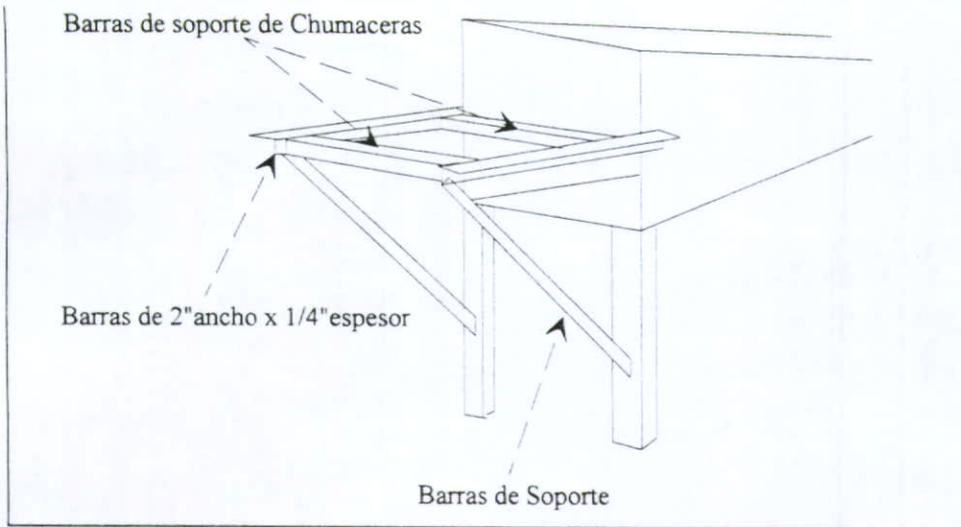


Fig. No. 25 Estructura de soporte de chumaceras.

A esta estructura se fijó la estructura de soporte del motor, que consistió en barras del mismo material anteriormente descrito, soldadas en forma paralela a la estructura superior, con una distancia entre ellas suficiente para fijar las patas del motor, y en las puntas se soldó en ángulo con la estructura superior dos barras más para dar rigidez y evitar la flexión de las barras. (ver fig. No. 26)

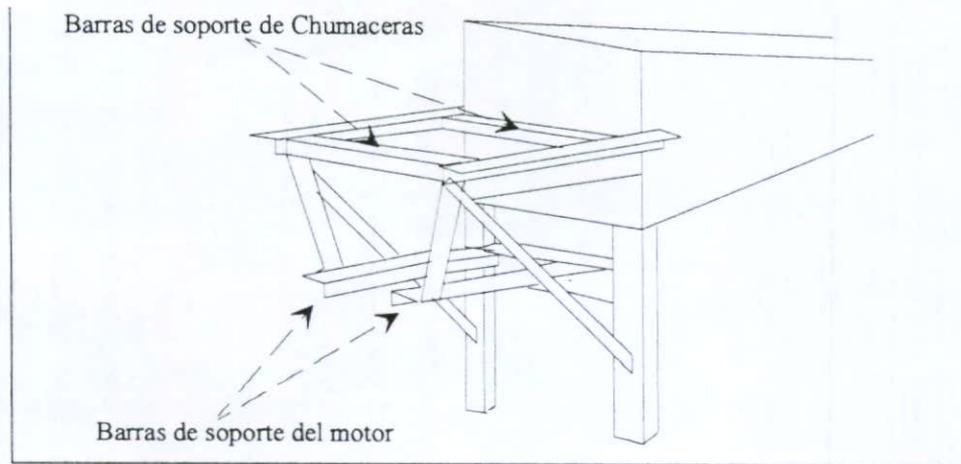


Fig. No. 26 Estructura de soporte del motor.

Enseguida se procedió a fijar las chumaceras y poleas, así como el motor, y montar las respectivas bandas impulsoras. Se calibró el ventilador antes de arrancarlo con el motor para cerciorarse de que no pegara. Las chumaceras que sostienen el eje impulsor del ventilador fueron donadas, por lo que habían sido hechas para alojar un eje de 1 1/8", así que se procedió a maquinar un par de bujes hechos de bronce en los tornos del laboratorio de la Universidad Panamericana que permitieran utilizar el eje de 1".

Para poder fijar el ventilador adecuadamente al eje, se hizo un barreno en la punta del eje, de tal manera que el tornillo opresor encajaba ahí e impedía el deslizamiento del ventilador. Para mayor seguridad de los usuarios del túnel y del equipo mismo, se machueleó la punta del eje para introducir ahí un tornillo de 1/4" de diámetro, que presionaría una lámina a manera de rondana contra el ventilador y el eje.

El sistema de transmisión de potencia del motor a los ejes se decidió hacerlo empleando poleas y bandas, ya que estas presentan gran flexibilidad para su instalación, requieren un mantenimiento menos frecuente y sufren mucho menor desgaste que los engranes. Se decidió utilizar una etapa intermedia entre el motor y el eje del ventilador a fin de reducir aun más las vibraciones que esta pudiera transmitir al ventilador mismo, generando mayor turbulencia y pudiendo llegar a ocasionar rose con la superficie de salida.

Habiendo hecho las primeras pruebas de comportamiento del sistema generador de flujo en general, se observó que en virtud de ser la sección de salida cuadrada, y la superficie que abarcaba el ventilador redonda, existía una gran pérdida de presión por estas esquinas, por lo que se decidió limitar el flujo que extraía el ventilador a una área que él mismo dibujaba, así que se soldó una placa con exterior cuadrado que embonaría con el extremo del difusor y en el centro un círculo en el que entraría el ventilador. (ver fig. No. 27)

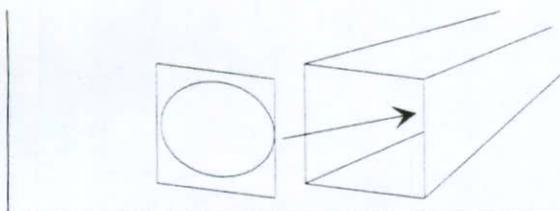


Fig. No. 27 Cubierta de lámina añadida en el extremo del difusor a fin de disminuir las pérdidas de presión en las esquinas.

El siguiente paso fue fijar los acrílicos de la sección de trabajo. En este túnel en virtud de los fines didácticos que se persiguen, se decidió dejar las dos caras laterales y la superior con acrílico, material que permite una fácil visualización de las prácticas efectuadas desde diversos ángulos y para varias personas simultáneamente, es por esto que se fijaron los acrílicos de una de las caras laterales y el de la superior con pegamento o resistol 5000, ya que se pretende que estas no sean removidas, contando con un empaque de neopreno en su parte intermedia.

Para la cara lateral restante, se tuvo que idear un sistema que fuera desmontable para permitir un fácil cambio de las piezas en estudio, pero a la vez con la suficiente fuerza para evitar pérdidas de flujo por el entorno, por lo que se decidió colocar tres bisagras remachadas en la parte inferior, que permitían abrir el acrílico, y fueron soldados tramos de ángulo en las cuatro esquinas de la mencionada cara, la función de estos ángulos es servir de soporte para unas barras que se fijan en ellos ejerciendo la presión suficiente para evitar fugas.

En la parte superior de esta cara se fijó con remaches una grapa opresora, que permite a la vez de evitar fugas, un fácil montaje de las barras de presión. (ver fig. No. 28)

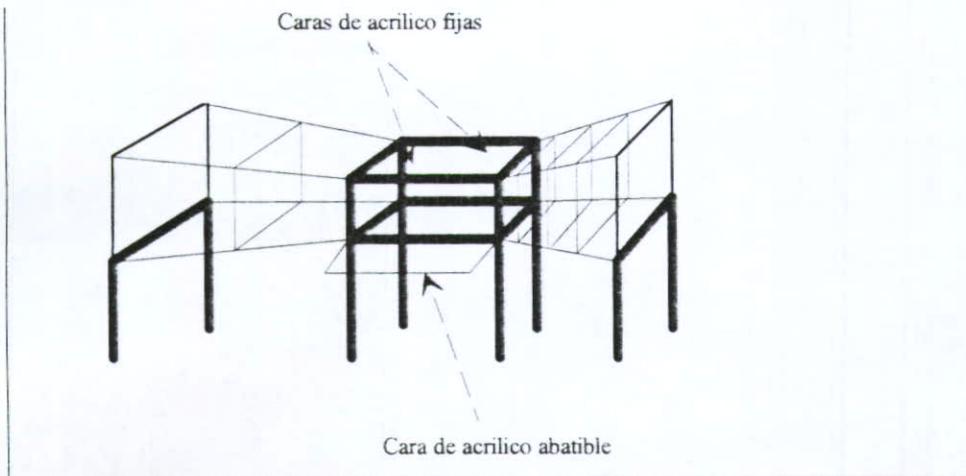


Fig. No. 28 Ubicación de las caras de acrílico.

Finalmente se procedió a construir la coraza protectora de las partes móviles del mecanismo de generación de flujo, utilizando malla rígida de hierro, se cortaron tres partes inicialmente, dos pedazos iguales que formarían las caras laterales y un tercero que crearía una superficie de revolución. Las caras laterales fueron soldadas a la tercera empleando soldadura oxy-gas, dada la magnitud de los pedazos a soldar y la facilidad que este tipo de soldadura representa para no deformarlos. Esta coraza se fijó en el extremo del difusor, aprovechando la superficie de sus costados.

### 1. Sistema de control de la velocidad del motor.

Se comenzó a trabajar con un variador de velocidad (controlando la frecuencia) marca Telemecanique, con el inconveniente de que dicho variador al ser donado, no se adecuaba a las condiciones existentes del motor también donado, ya que dicho variador exigía un motor para corriente trifásica, por lo que la primera decisión tomada fue recablear las terminales de los embobinados de arranque y trabajo del motor a fin de poder conectarlo a 220 volts, se hizo la conexión correspondiente como se muestra en la figura No. 29.

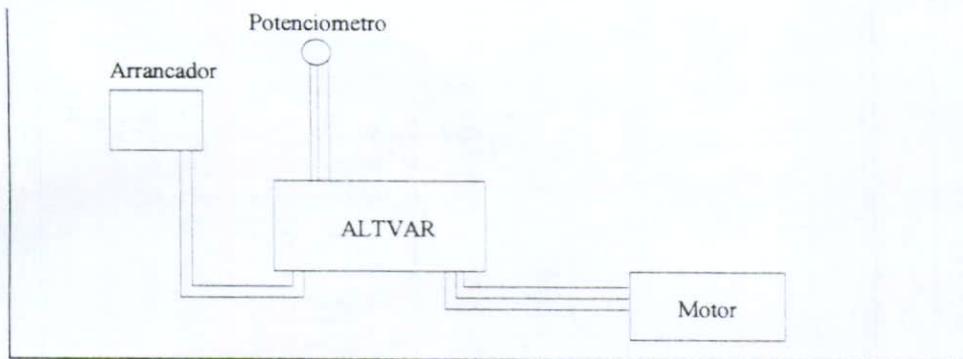


Fig. No. 29 Diagrama de conexión del motor al variador de velocidad.

Pero el siguiente problema fue que el variador por sí solo no abastecía la corriente de arranque que le solicitaba el motor de 10 A., ya que el motor al ser monofásico y fraccionario arrancaba por capacitores, y el variador no permitía que éstos cumplieran su función. En seguida se decidió implementar un mecanismo electromecánico que permitiera que el motor arrancara primeramente con la corriente de la línea y una vez arrancado alternara la alimentación eléctrica a la proporcionada por el variador.

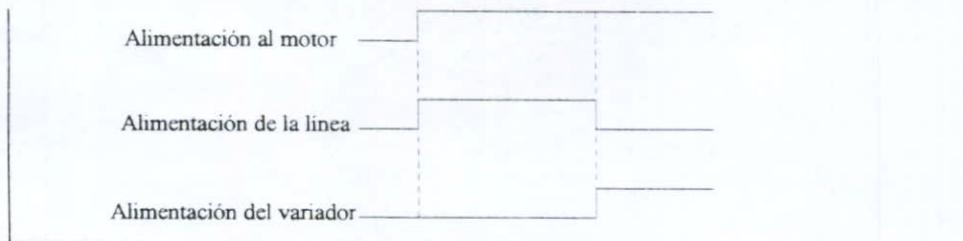


Fig. No. 30 Propósito del mecanismo de switcheo.

Por lo que se emplearon tres contactores más, un temporizador y un arranque general, dicho circuito está ideado para que el cambio al controlador de velocidad sea automático sin

que lo note el alumno que esta haciendo la práctica, lo que se observa esquemáticamente en la fig. No. 30.

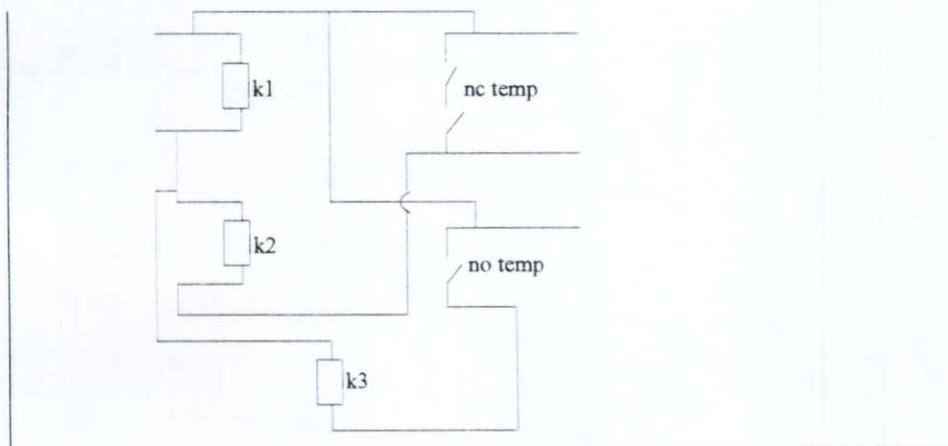


Fig. No. 31 Diagrama de conexión de los relevadores de switcheo.

Desafortunadamente una vez más el motor debido a la carga no lograba conservar la inercia suficiente para aguantar el cambio, por lo que al momento de cambiar a la alimentación proporcionada por el variador, éste se apagaba.

Se procedió a buscar un motor que originalmente fuera trifásico, y éste se encontró proporcionado por el laboratorio de ingeniería electromecánica de la Universidad Panamericana, se hizo la conexión original abastecido únicamente por la corriente proporcionada por el variador, y funcionó adecuadamente, por lo que se procedió a reemplazarlo por el motor original, una vez montado, se descubrió que el motor se encontraba dañado y al momento de arrancar no lograba vencer la carga. El inconveniente de este motor era que ya había sido rembobinado, y se había usado en prácticas de laboratorio, situación que permitió deducir que los embobinados muy seguramente se encontraban dañados.

El siguiente paso fue conseguir un motor trifásico, el cual fue donado por el laboratorio de la Universidad Panamericana, siendo este un motor de 1 H.P., marca SIEMENS para

trabajar a 220 o 440 volts, se hizo la conexión original empleando únicamente el variador de velocidad y funcionó correctamente. Se procedió a montarlo en la estructura de soporte, al ser éste un poco más grande que el inicialmente instalado, los barrenos para fijarlo no coincidieron, así que se hicieron otros nuevos, y se tuvo que cambiar la banda que conectaba el eje del motor con la polea de conversión.

Una vez hechas las pruebas de funcionamiento previo, se buscó la forma de fijar el variador de velocidad de tal manera que quedara en una ubicación de fácil acceso y a la vez protegido de posibles golpes accidentales, por lo que se decidió que el lugar ideal era debajo de la sección de trabajo, así pues se fijaron un par de ángulos en los que embonan los orificios de sujeción del variador. De igual manera se fijó en el poste de soporte de la sección de trabajo el arracador, procurando que quedara en una posición estratégicamente accesible para oprimir el botón de paro en una emergencia.

Los hilos que alimentan el motor desde el variador de velocidad, se hicieron pasar a través de un tubo de cobre de 1/2" que fue fijado con omegas barrenadas en las estructuras de soporte.

Propiamente el dispositivo que se empleará directamente para obtener la variación en la velocidad del motor es un potenciómetro de 5 Kohms, colocado sobre unas escuadras que a su vez se fijaron en el tramo de tubular en la parte superior izquierda de la zona de trabajo, y el cableado hasta el variador de velocidad se hizo a través del mismo tubular.

Posteriormente se tenía la dificultad de encontrar un dispositivo que midiera la velocidad del flujo en la zona de trabajo, finalmente se encontró que el diodo LM335 funciona como un sensor de temperatura de precisión, y en las características de éste componente descritas en el manual de semiconductores de "National" se encuentra una gráfica del coeficiente de resistencia térmica del diodo en función de la velocidad del aire, las lecturas obtenidas de este componente son dadas en grados Kelvin. Según descripción de este manual, la lectura debe ser

tomada con un voltmetro, en donde la cantidad leída (milivolts) está calibrada para que corresponda directamente a los grados Kelvin especificados.

El procedimiento empleado para elaborar una gráfica que comparara las r.p.m. entregadas por el motor fue el siguiente:

a) Armar el circuito mostrado en la fig. No. 32 obtenida del manual de semiconductores de "National".

b) En virtud de que se tenía que entrar a la gráfica de coeficiente de resistencia térmica contra velocidad del aire (ver Anexo No. 1) en la zona de trabajo se empleó la siguiente fórmula para calcular dicho coeficiente en función del incremento de temperatura y el tiempo registrado:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-t/Rc} \quad (2.6)$$

donde: T= Temperatura final

T<sub>0</sub>= Temperatura Inicial

T<sub>∞</sub> = Temperatura del medio ambiente

t = tiempo registrado.

R = Coeficiente de resistencia térmica

C= Constante

c) Se tomaron lecturas en las que se registraban las r.p.m. a las que giraba el motor, la temperatura inicial (ctte.), la temperatura final (ctte.), y el tiempo que tomaba en alcanzar dicho decremento:

Tabla No. 1 Lecturas tomadas para elaborar la gráfica de r.p.m. del motor vs. FPM entregados.

T <sub>0</sub>	T	dT	tiempo	°C/W	r.p.m.	FPM
360°K	340°K	20°C	16.25	400.22	0	0
360°K	340°K	20°C	11.26	277.322	228	50
360°K	340°K	20°C	10	246.289	260	90
360°K	340°K	20°C	9.99	246.043	370	95
360°K	340°K	20°C	7.8	192.106	534	100

360°K	340°K	20°C	6.37	156.886	710	190
360°K	340°K	20°C	5.87	144.572	840	210
360°K	340°K	20°C	4.39	108.121	1365	410
360°K	340°K	20°C	3.79	93.3437	1724	700

d) La fórmula No. 2.6 se despejó primeramente para obtener la constante C, ya que al ver en la gráfica podemos determinar el coeficiente de resistencia térmica para velocidad cero, como se describe a continuación:

en  $V_0$ ,  $R = 400$  °C/W y  $t = 16.25$  seg., por lo tanto:

$$C = \frac{-t}{\ln\left(\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty}\right) R}$$

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{340 - 291}{360 - 291} = 0.7101$$

$$C = \frac{-16.25}{\ln(0.7101)(400)} = 0.1186$$

e) Una vez encontrada la constante se despejó la fórmula para obtener el resto de los coeficientes de transferencia de calor para el resto de las velocidades:

$$R = \frac{-t}{\ln(0.7101)(0.1186)}$$

f) Una vez que se calcularon todos los datos de coeficiente de resistencia térmica, se leyeron los valores correspondientes en pies por minuto de la gráfica del Anexo No. 1.

g) Finalmente con los datos de las lecturas de las revoluciones del motor contra los pies por minuto correspondientes en la zona de trabajo, se elaboró la gráfica de comportamiento que se muestra en el Anexo No. 2.

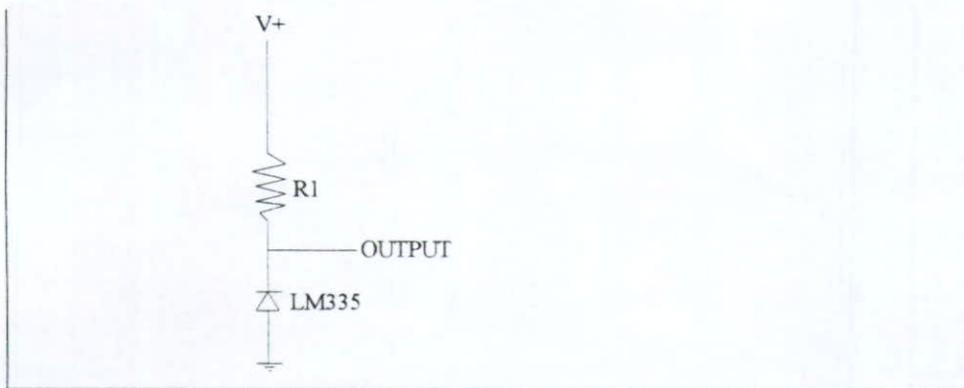


Fig. No. 32 Diagrama de conexión del detector de velocidad del flujo en la zona de trabajo.

Como último procedimiento en la instalación de componentes del túnel de viento, se efectuó el montaje de la lámpara fluorescente de luz negra en la parte superior de la sección de trabajo, la cual es desmontable para permitir fijar objetos en el acrílico superior. Esta cuenta con su apagador propio.

### III. MANUAL DE OPERACIONES.

El presente capítulo tiene la intención de guiar al usuario en el conocimiento y ubicación de las partes que componen el túnel de viento, de tal manera que ubique fácilmente sus componentes al ser citadas en el manual de prácticas, así como las recomendaciones necesarias para un adecuado uso y mantenimiento del mismo

#### A. Partes que lo componen.

El túnel de viento para su estudio se dividirá cinco secciones, las cuales, son: 1. sección de entrada o tobera, 2. sección de trabajo, 3. sección de salida o difusor, 4. sistema de generación de flujo y 5. sistema de regulación de velocidad y mecanismos de control. (ver fig. No. 34)

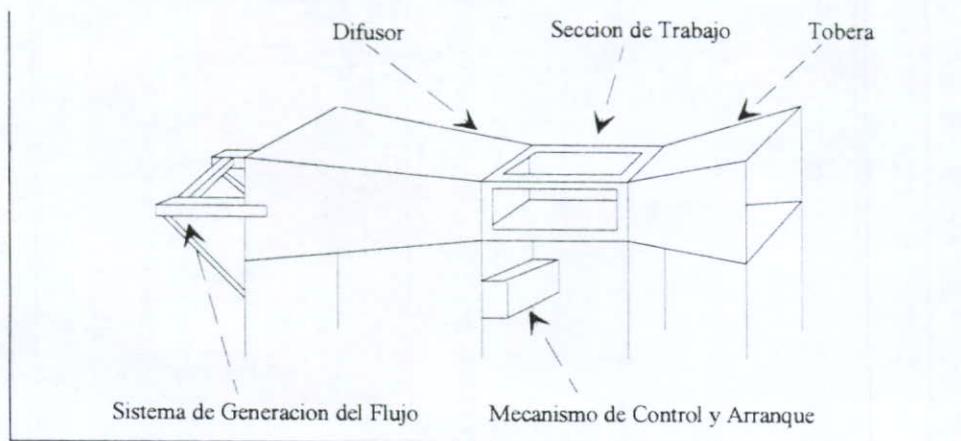


Fig. No 34 Secciones componentes del túnel de viento.

En la tobera se encuentran las mallas protectoras, tenga cuidado de no ejercer presión en las caras de las mismas, ya que podrían desprenderse de los remaches que las sujetan. esta sección se encuentra soldada a la sección de trabajo. La sección de trabajo cuenta en tres de sus caras laterales con láminas de acrílico de 90 x 45 cm., el acrílico es de 0.3 cm de espesor. Una de las caras laterales es abatible, y cuenta con tres bisagras en su parte inferior, sostenidas

con tres remaches cada una, en la parte superior de esta cara, situado al centro se encuentra fijo un mecanismo de sujeción, este mecanismo se acciona presionándolo, con lo que permite una apertura libre. En los extremos laterales de esta misma cara, se encuentran soldados ángulos de fierro de 1/4" de espesor, éstos ángulos sostienen el tubo que presiona la cara abatible contra la estructura de lámina del túnel de viento, manteniendo un selle con una máxima reducción de pérdidas. (ver fig. No. 35)

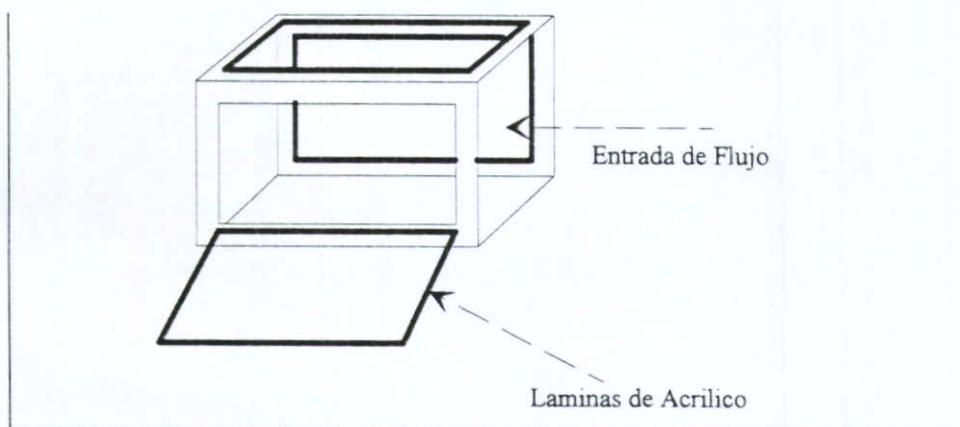


Fig. No. 35 Empaque de Neopreno en las caras de acrílico.

Tenga precaución al abrir la lámina abatible de que no caiga libremente apoyada sobre las bisagras, ya que esto podría provocar una grieta en el acrílico en el lugar de los remaches, la cual podría fracturar la lámina completa.

Los pasos a seguir para abrir adecuadamente la lámina son los siguientes: a) remueva los tubos opresores laterales, jalándolos en sentido contrario al tope de los ángulos, tenga cuidado y mantenga la cara fuera del alcance del tubo, ya que como se encuentran sostenidos a presión, pueden salir con gran fuerza, b) una vez quitados ambos tubos presione el mecanismo de sujeción superior, y deslice la lámina de acrílico hacia usted, la lámina dibuja una circunferencia en su trayecto de apertura. (ver fig. No. 36)

La manera adecuada de limpiar las láminas de acrílico es empleando una frazada encerada, nunca utilice solventes (como thinner, acetona, alcohol, gasolina blanca, etc.) ya que éstos pueden llegar hasta a perforar la lámina, y si las cubiertas se encuentran muy llenas de polvo, procure primero quitar el polvo sin tallar la superficie con alguna aspiradora o compresor

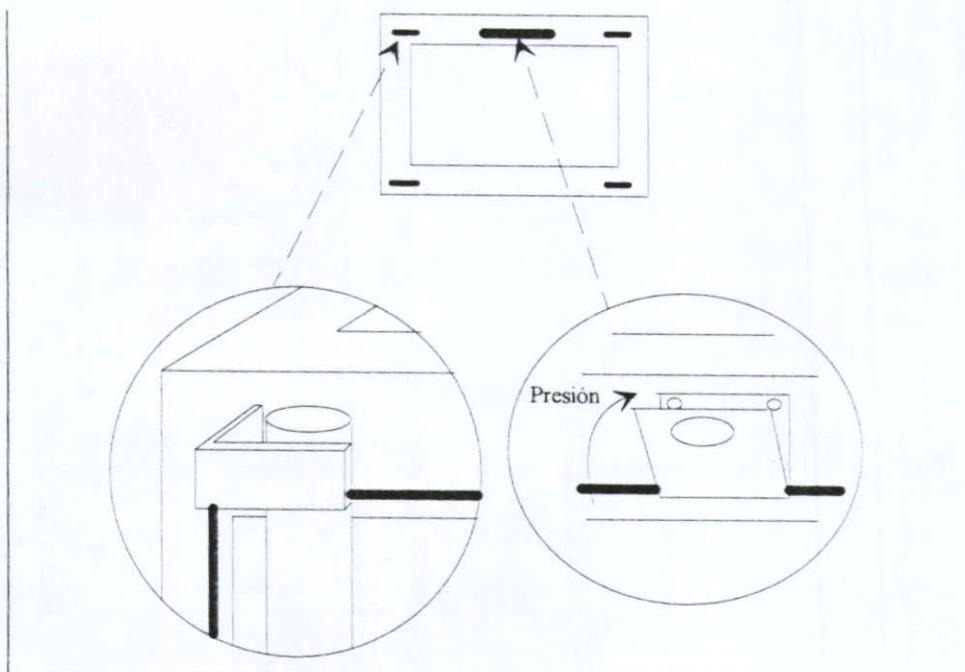


Fig. No. 36 Método de sujeción de la lámina de acrílico abatible.

La sección de salida o difusor se encuentra unida a la sección de trabajo mediante bridas, estas bridas cuentan en la mitad de su unión con tiras de neopreno a manera de empaque; como se mencionó anteriormente, el objetivo de las bridas es permitir la división del túnel y facilitar su reubicación.

Tenga cuidado al momento de reensamblar el túnel de que el empaque de neopreno siga cumpliendo su función, es recomendable que se cambie el empaque cuando se vea muy reseco o resquebrajado, y de esta manera recuperar la fluencia del material al aplicar la presión y obtener un sello efectivo y con las menores pérdidas posibles. (ver fig. No. 37)

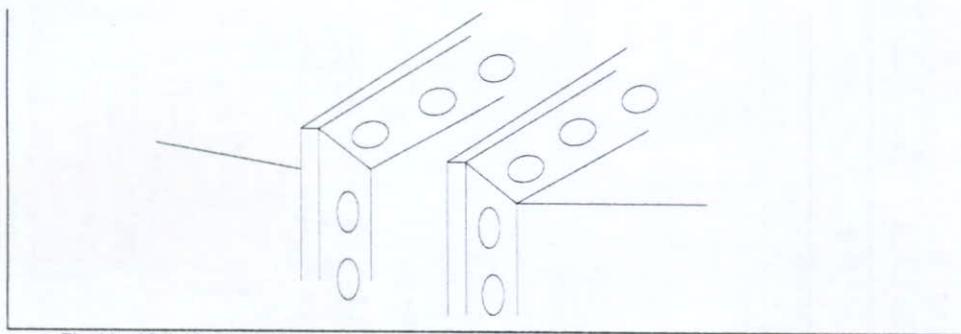


Fig. No. 37 Bridas de unión de la sección de trabajo con el difusor.

En el difusor se encuentra nuevamente una malla protectora, en dado caso de que se desprenda el objeto de prueba, esta malla será la encargada de detenerlo, para sacarlo basta introducir un palo de madera o similar de aproximadamente 1.50 m. de largo, y jalar el objeto con el mismo, al sacar el objeto tenga cuidado de no presionar con el palo la malla de tal manera que pueda romperla o desprenderla.

Al final de esta sección se encuentran las partes que componen el mecanismo de generación de flujo propiamente que son como se describen a continuación: la estructuras de soporte tanto de las chumaceras como del motor (que se describieron detalladamente en el capítulo de diseño y construcción). Sobre la estructura superior, se tienen las chumaceras que a su vez soportan los ejes del ventilador y de la polea doble de conversión de velocidades.

Ambos ejes son de hierro de 1" de diámetro de longitud, y cuentan con ranura para cuñero a la mitad de los mismos. Las chumaceras que soportan el eje de la polea doble son marca SKF autoalineantes para eje de diámetro de 1", a su vez las chumaceras que soportan el

eje del motor son más antiguas (provenientes de una donación al proyecto), por lo que se tuvo que fabricar un buje de bronce, ya que el diámetro original para el que fueron fabricadas era de 1¼". Tenga precaución de engrasar frecuentemente las chumaceras para tener una adecuada lubricación en los balines y los ejes giren libre y eficientemente. Las chumaceras se encuentran sujetas a la estructura de soporte con tornillos de ¼" de diámetro y 1" de longitud, con cabeza y tuerca hexagonales, cada chumacera lleva dos tornillos y son cuatro chumaceras en su totalidad.

Las poleas son hechas de aluminio, dos para un eje diámetro de 1" y una más para diámetro de 1¼". Las de eje de 1" son de 12" y 2" de diámetro exterior respectivamente, que son las dos que van montadas en los ejes de las chumaceras. Estas poleas cuentan con cuña y tornillo opresor, para un uso moderado procure revisar el apriete de éstos cada tres meses aproximadamente. La tercer polea para eje de 1¼" es la que sale del eje del motor, esta cuenta únicamente con tornillo opresor. Los tornillos opresores emplean herramienta de llaves allen.

El túnel de viento emplea dos bandas, una de 37 cm. y otra de 122.5 cm., estas bandas van de la polea del eje del motor a la polea doble, y la segunda de la polea doble a la polea impulsora del eje del ventilador. Son bandas tipo "A". Estas bandas deberán ser reemplazadas cuando se observe resequeidad o agrietamiento en su superficie.

Al final se tiene el motor, que es marca SIEMENS de 1 H.P. de potencia, de alimentación trifásica 220 o 440 volts, de rotor jaula de ardilla, y que se encuentra sujeto a la estructura de soporte mediante cuatro tornillos de ¼" de diámetro por 1" de longitud, con cabeza y tuerca hexagonales.

Cubriendo el mecanismo generador de flujo se tiene una coraza protectora, hecha de malla de hierro, la función de esta malla es evitar en la medida de lo posible, errores o accidentes en los usuarios del túnel, en lo concerniente a introducir objetos o extremidades

humanas tanto a las aspas del ventilador como a las poleas o bandas impulsoras. Esta malla se encuentra sujeta a la parte final del difusor mediante tornillos de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro con rondanas intermedias, que permiten desmontarla para acceder fácilmente y efectuar mantenimiento o reparaciones (ver fig. No. 38)

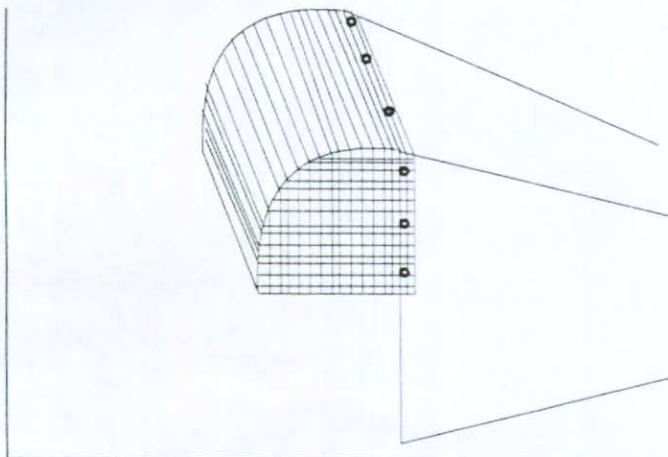


Fig. No. 38 Coraza protectora del mecanismo de transmisión de potencia.

Finalmente en este conjunto encontramos el ventilador axial, que cuenta con siete aspas, este ventilador se encuentra fijo a su eje mediante un tornillo opresor perpendicular al eje, y una laminilla al frente del eje que sujeta al ventilador para impedir que salga disparado hacia el frente, el tornillo que sujeta la laminilla contra el ventilador entra al centro del eje en sentido perpendicular a este, y es de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro con cabeza cuadrada. (ver fig. No. 39)

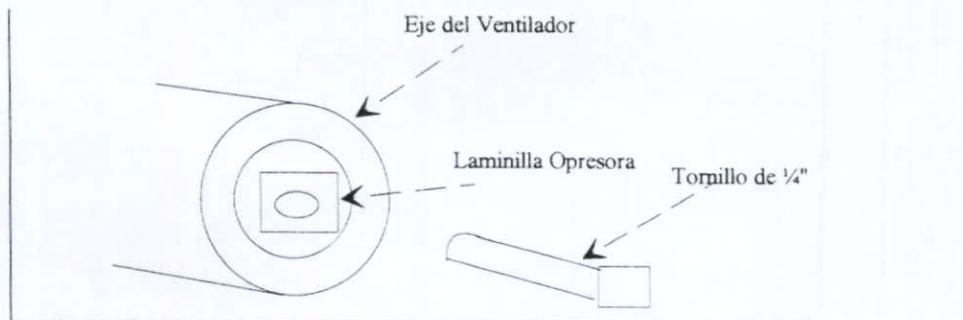


Fig. No. 39 Método de sujeción de ventilador al eje.

Si por algún motivo tuviera que desmontar las chumaceras y eje del ventilador, al reinstalarlo verifique antes de arrancar que esté perfectamente centrado y no pegue en ninguna sección del difusor. Actualmente para lograr su centrado, se colocaron calzas hechas de pequeñas laminillas en las bases de las chumaceras del eje del ventilador, para así eliminar los pequeños desajustes inherentes al corte y sujeción de los materiales.

La pintura amarilla indica los dispositivos que por su movimiento representan algún tipo de peligro, y a los cuales se debe prestar especial atención, procure mantener siempre con colores vistosos estas áreas.

Los dispositivos que integran los mecanismos de control y regulación de velocidad son: el variador de velocidad marca Telemehanique con capacidad para controlar motores trifásicos de hasta 2 H.P., un arrancador a base de un contactor de la misma marca para motores de 220 volts y protección de hasta 15 amperes, con botones de arranque y paro, un potenciómetro con perilla de 5 Kohms y el motor anteriormente descrito. (ver fig. No. 40)

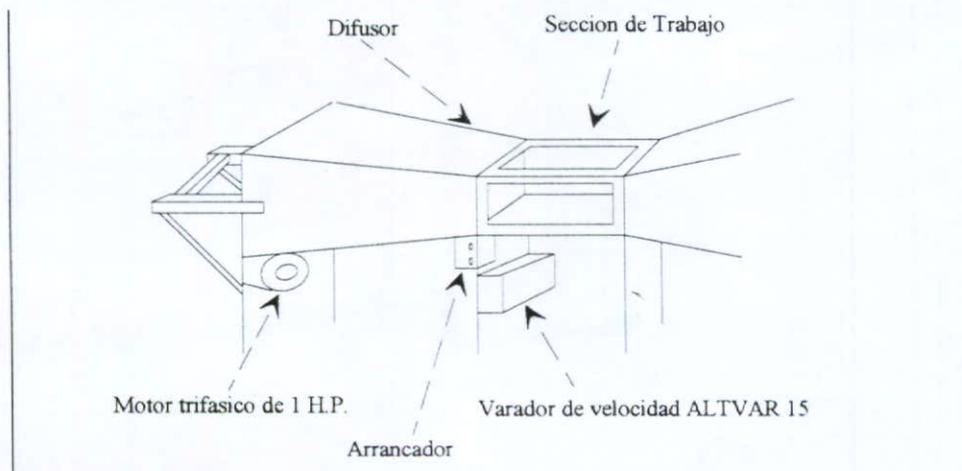


Fig. No. 40 Ubicación física de los mecanismos de control y regulación de la velocidad del motor.

El arrancador tiene dos botones, uno verde de arranque y otro rojo de paro, por tener un contactor, este a la vez sirve de protección contra sobrecorriente para el variador de velocidad, la marca de este arrancador es Telemechanique. El arrancador deberá alimentarse con dos hilos "vivos" de corriente, es decir con 220 volts entre fases o líneas. (ver fig. No. 41)

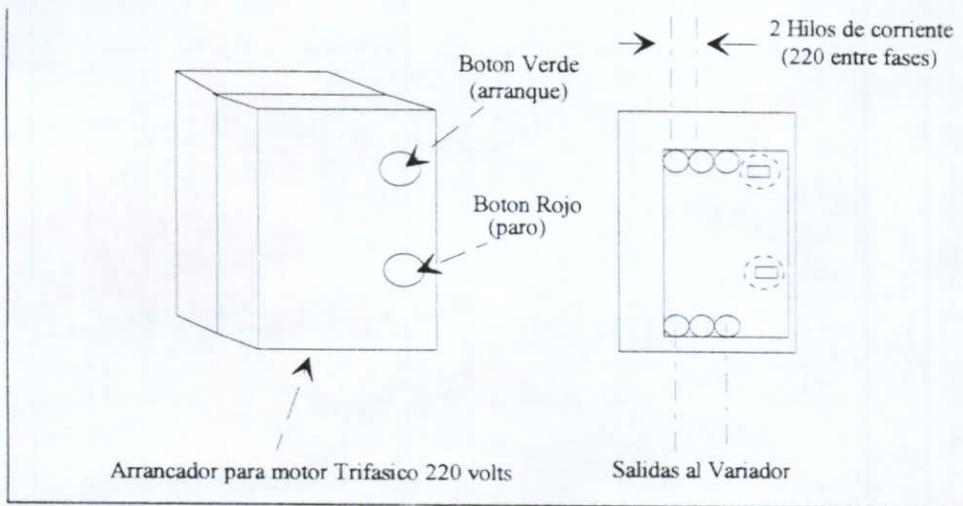


Fig. No. 41 Diagrama de conexión del arrancador.

Por ser equipos eléctricos y electrónicos, evite cualquier contacto de éstos con algún tipo de fluido que pueda ocasionar un corto circuito, y cerciórese de mantener siempre cerrada la tapa del arrancador para evitar riesgos de descargas eléctricas a algún usuario. Las conexiones tanto de la corriente al arrancador como del arrancador al variador de velocidad se encuentran ocultas dentro de la caja del arrancador, sin embargo verifique que siempre estén bien encintadas las puntas de conexión del motor al variador de velocidad. Si por cualquier motivo necesita desconectar la alimentación eléctrica del motor, el diagrama de conexión se encuentra en la coraza del motor, utilice el diagrama especificado para bajo voltaje, es decir para 220 volts, ya que el de alto voltaje es para 440 volts, cada una de las puntas del motor están etiquetadas con su numero correspondiente, procure que estas etiquetas no sean desprendidas, de otra manera será muy difícil recablear el motor. Como experiencia personal para distinguir

entre el 6 y el 9, vea los números de las etiquetas de conexión con el punto abajo a la derecha. (6. --- 9.).

El diagrama de conexión específico de componentes al variador se describe en la figura No. 42

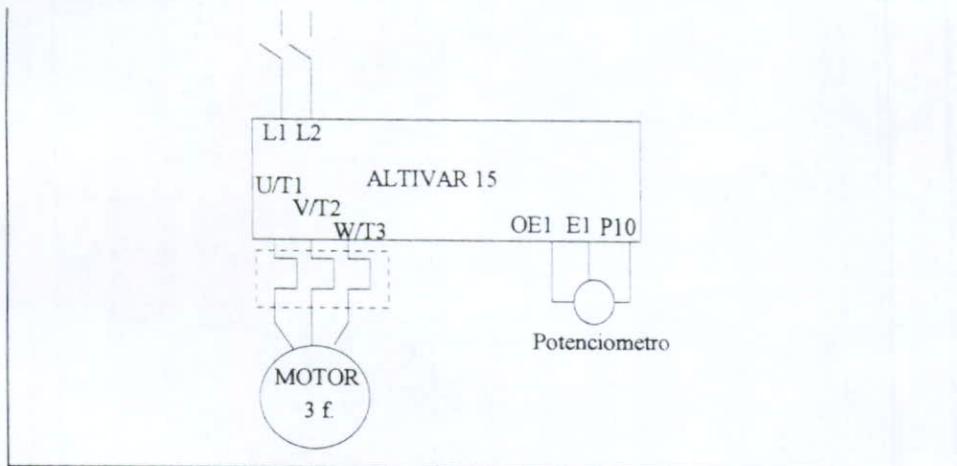


Fig. No. 42 Diagrama de conexión del variador de velocidad.

El sistema de ayuda para la visualización de las líneas de flujo provocadas por el paso del humo a través de la figura en estudio, esta formado por una lámpara fluorescente de 20 W. de luz negra y su respectivo apagador. (Ver fig. No. 43)

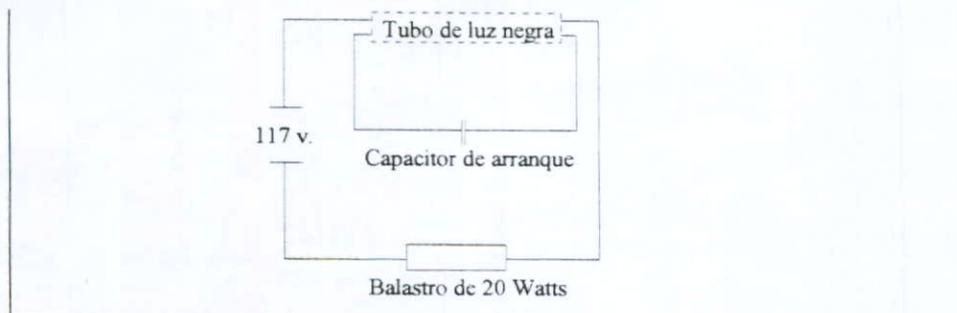


Fig. No. 43 Diagrama de conexión de la lámpara fluorescente.

El tubo de luz fluorescente se encuentra cubierto por una tapa que cumple doble función: a) brindar protección al tubo y evitar su ruptura y b) evitar que la luz incida directamente en los ojos de los practicantes, que aunque no es nociva para los ojos, si produce un deslumbramiento temporal. (ver fig. No. 44)

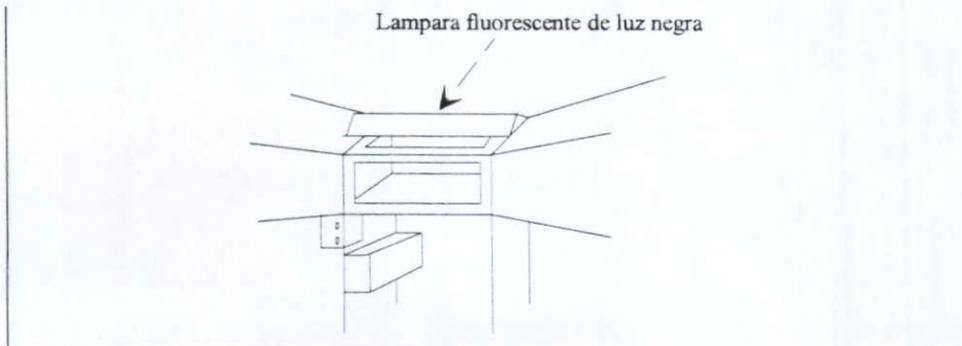


Fig. No. 44 Cubierta protectora del tubo de luz fluorescente.

Para evitar posibles vibraciones en el túnel ocasionadas por desbalances en la estructura, cuenta en sus ocho patas con tapones de plástico de forma cuadrada que entran en el tubular, dichos tapones en el centro cuentan con un roscado, en el que se ajusta la parte inferior del tapón de forma redonda (que es la que va unida al tornillo), que finalmente sienta en el piso. Cerciórese de que las ocho patas siempre mantengan un contacto firme con el piso ajustando los tornillos de los tapones.

Para obtener mejores resultados en las prácticas efectuadas dentro del túnel, procure tener lo más despejado posible las áreas de entrada y salida del túnel, es decir libre de paredes u objetos que pudieran desviar o disminuir el flujo que se pretende circule a través de la sección de trabajo.

#### IV. VALIDACIÓN DEL DISEÑO Y ELABORACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO.

##### A. Diseño de prácticas de laboratorio

Las prácticas de laboratorio que en este capítulo se presentan, tienen la intención de demostrar la utilidad didáctica del presente proyecto, y a la vez validar el buen funcionamiento del mismo. Constarán de las siguientes partes: a) Objetivos perseguidos, b) Preguntas teóricas que fundamentaran lo visto en la práctica (la intención es que estas preguntas sean resueltas previamente a la realización de la práctica), c) Recomendaciones y sugerencias, d) Procedimiento, e) Resultados obtenidos, f) Conclusiones.

Se sugiere realizar las siguientes prácticas: 1. Teoría de modelos y 2. Visualización de las líneas de flujo, 3. Determinación del coeficiente de arrastre

##### PRÁCTICA # 1 “TEORÍA DE MODELOS”

###### OBJETIVO:

a) El alumno visualizará la semejanza geométrica y cinemática, y aplicará dichas leyes de semejanza, así como conceptos de números adimensionales en modelos y prototipos.

###### PREGUNTAS TEÓRICAS:

- Explique los tipos de semejanza existentes en teoría de modelos.
- Cuáles son los números adimensionales más empleados en mecánica de fluidos ?

###### MATERIAL NECESARIO

- \* Esferas de Unicel (de al menos dos tamaños distintos y que cumplan la semejanza geométrica)
- \* Hilo de material flexible.
- \* Transportador.

- \* Tacómetro digital.
- \* Báscula
- \* Vernier
- \* Termómetro

#### RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS:

- a) Tenga precaución con las aspas del ventilador, no acerque las manos ni cualquier otro objeto.
- b) Verifique que la cubierta de acceso a la sección de trabajo se encuentre bien cerrada y que no existan fugas.

#### PROCEDIMIENTO:

1. Obtenga los datos físicos de las esferas de unicel, como lo son su diámetro y peso, empleadas como modelo y prototipo respectivamente.
- 2 Introduzca la esfera de unicel que servirá como modelo en la sección de trabajo, fijándola en la cubierta superior, tendiendo de un hilo de aproximadamente 15 a 20 cm. de longitud (procurando que esta quede al centro de la sección de trabajo para una mejor visualización).
3. Cierre perfectamente la cubierta de acceso a la sección de trabajo.
4. Antes de encender el motor, verifique que el potenciómetro de regulación de velocidad se encuentre en cero.
5. Fije el potenciómetro en un valor estable y fijo, registre el valor de la velocidad del motor y la obtenida en la sección de trabajo.
6. Tome la medida de los catetos que forman el ángulo de desfazamiento y obtenga éste.
7. Tome la lectura de la velocidad a la que gira el eje del motor (r.p.m.) y de la gráfica de r.p.m. vs. CFM obtenga la velocidad en la zona de trabajo. (Efectúe tres corridas a velocidades distintas).

8. Utilizando Reynolds como el número adimensional comparativo, iguale y despeje la velocidad a la que debe trabajar el prototipo.

9. Coloque la esfera de unicel que servirá como prototipo conservando las mismas condiciones utilizadas para el modelo.

10. Iguale experimentalmente la velocidad obtenida para el prototipo mediante cálculos, y mida físicamente el ángulo obtenido. (Ver fig. No. 33)

11. Tome la medida de los catetos que forman el ángulo de desfazamiento y obtenga éste.

12. Sustituya el ángulo del prototipo en la fórmula de coeficiente de arrastre y compare dicho coeficiente con el obtenido con los datos del modelo.

13. Observe si se cumplió la igualdad.

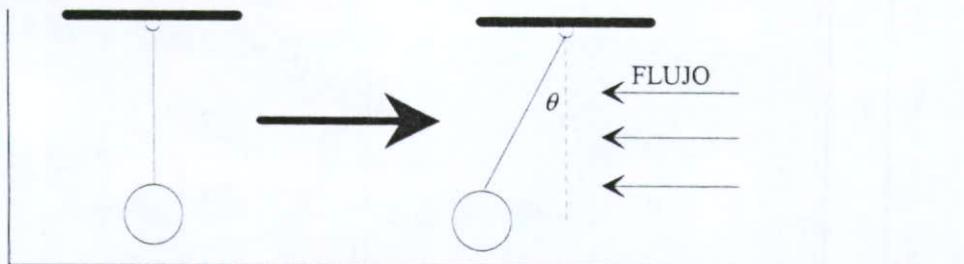


Fig. No. 33 Formación del ángulo de desfazamiento ante la presencia de flujo

Para calcular el coeficiente de arrastre a partir del ángulo de desfazamiento utilice la siguiente fórmula:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{C_D \rho V_{\infty}^2 \pi D^2}{8W} \right) \quad (3.1)$$

Donde:  $C_D$  = Coeficiente de arrastre

$W$  = peso de la esfera (N)

$V_{\infty}$  = la velocidad de trabajo (m/s)

$D$  = diámetro de la esfera (m)

$\rho$  = densidad ( $\text{kg/m}^3$ )

Finalmente se procede a corroborar los datos experimentalmente.

## RESULTADOS.

Tabla No. 2 Recolección de datos de las corridas de la práctica de modelos y prototipos.

Diámetro <sub>m</sub> =		W <sub>m</sub> =						
# De corrida	RPM <sub>m</sub>	V <sub>m</sub>	T	θ <sub>m</sub>	C <sub>Dm</sub>	Re	ρ	μ
1								
2								
3								
4								
5								
Diámetro <sub>p</sub> =		W <sub>p</sub> =						
# De corrida	RPM <sub>p</sub>	V <sub>p</sub>	T	θ <sub>p</sub>	C <sub>Dp</sub>	Re	ρ	μ
1								
2								
3								
4								
5								

C<sub>Dm</sub>/C<sub>Dp</sub>

# De corrida	
1	
2	
3	
4	
5	

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFÍA.

Se espera que en el renglón de conclusiones, el alumno discuta los fenómenos observados, las discrepancias entre lo esperado y lo obtenido así como indicar las posibles fuentes de error y las acciones a tomar para minimizarlas.

## PRÁCTICA # 2 “VISUALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS DE FLUJO”

### OBJETIVO:

a) El alumno podrá visualizar las líneas de flujo a través de diferentes perfiles, en los cuales observará la formación de remolinos por desprendimiento de capa límite, y la utilidad de la aerodinámica en los vehículos modernos.

### PREGUNTAS TEÓRICAS:

- a) Que es capa límite.
- b) Que son las líneas de corriente
- c) Que es el fuselado de perfiles

### MATERIAL NECESARIO:

- \* Esferas de Unicel (de al menos dos tamaños distintos y que cumplan la semejanza geométrica)
- \* Hilo de material flexible
- \* Tabla de madera de 20 x 20 cm. aproximadamente
- \* Tacómetro digital
- \* Aceite obtenido de las tiendas de electrónica para generar humo en las fiestas (1/2 lt. aproximadamente)
- \* Cacerola
- \* Parrilla eléctrica
- \* Resistol

## RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS:

a) Tenga precaución con las aspas del ventilador, no acerque las manos ni cualquier otro objeto.

b) Verifique que la cubierta de acceso a la sección de trabajo se encuentre bien cerrada y que no existan fugas.

c) Mantenga alguna puerta de salida al exterior o ventana permanente abierta, para prevenir cualquier acumulación de humo fuera de control.

d) Los túneles de viento empleados para la visualización de flujo, suelen operar a velocidades muy bajas, por lo tanto procure alcanzar velocidades no turbulentas que pudieran alterar la visualización.

## PROCEDIMIENTO

a) Introduzca una pieza en la sección de trabajo, y sujétela firmemente a la cubierta superior de tal manera que no se desplace en la dirección del flujo.

b) Cierre perfectamente la lamina de acrílico abatible.

c) Vierta un poco de aceite en una cacerola y póngala sobre la parrilla eléctrica.

d) Encienda la luz fluorescente que emite luz "negra".

e) Encienda el ventilador manteniéndolo en una velocidad tal que permita la visualización de las líneas de flujo que forma el humo al pasar por el objeto.

f) Repita los pasos anteriores colocando la placa de madera perpendicular al flujo y observe la diferencia.

g) Adhiera un poco de pegamento en la punta de una de las esferas de unicel, con el pegamento fresco introduzca la esfera en algún tipo de material que proporcione una consistencia rugosa a la punta de la esfera. Observe las líneas de flujo.

h) Introduzca otros objetos que considere permitan una adecuada visualización.

RESULTADOS.

CONCLUSIONES.

## BIBLIOGRAFÍA.

### PRÁCTICA # 3 “DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE”

#### OBJETIVO:

- a. El alumno obtendrá la curva del coeficiente de arrastre contra el número de Reynolds y comparará esta contra gráficas similares obtenidas de la literatura.
- b. El alumno visualizará la influencia del ángulo de desfazamiento en la obtención del coeficiente de arrastre.

#### PREGUNTAS TEÓRICAS:

1. Explique que es el coeficiente de arrastre.
2. Que relación tiene este con el número de Reynolds?
3. Explique los tipos de resistencia que ofrece un modelo ante el flujo.

#### MATERIAL NECESARIO

- \* Bolas de Unicel
- \* Hilo de material flexible.
- \* Transportador.
- \* Tacómetro digital.
- \* Báscula
- \* Vernier
- \* Termómetro

#### RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS:

- a) Tenga precaución con las aspas del ventilador, no acerque las manos ni cualquier otro objeto.

b) Verifique que la cubierta de acceso a la sección de trabajo se encuentre bien cerrada y que no existan fugas.

#### PROCEDIMIENTO:

1. Obtenga los datos físicos de la esfera de unicel, como lo son su diámetro y peso.
  2. Introduzca la esfera de unicel en la sección de trabajo, fijándola en la cubierta superior, tendiendo de un hilo de aproximadamente 15 cm. de longitud (la longitud depende del diámetro de la esfera, procurando que ésta quede centrada en la sección de trabajo).
  3. Cierre perfectamente la cubierta de acceso a la sección de trabajo.
  4. Antes de encender el motor, verifique que el potenciómetro de regulación de velocidad se encuentre en cero.
  5. Encienda el motor, y tome los valores de los catetos que forman el ángulo de desfazamiento en aproximadamente diez valores intermedios de velocidad entre el reposo y la máxima permitida por el variador, y posteriormente obtenga dicho ángulo. (Ver fig. No. 33)
  6. Tome la lectura de la velocidad a la que gira el eje del motor (r.p.m.) y de la gráfica de r.p.m. vs. CFM obtenga la velocidad en la zona de trabajo.
  7. Tome las lecturas de la temperatura en cada corrida.
  8. Tabule los valores.
  9. Obtenga los valores del  $C_D$  y Reynolds, a partir de la siguiente fórmula:
10. Compare la gráfica obtenida contra la consultada en la literatura.

$$C_D = \frac{8W \tan \theta}{\rho V_x^2 \pi D^2}$$

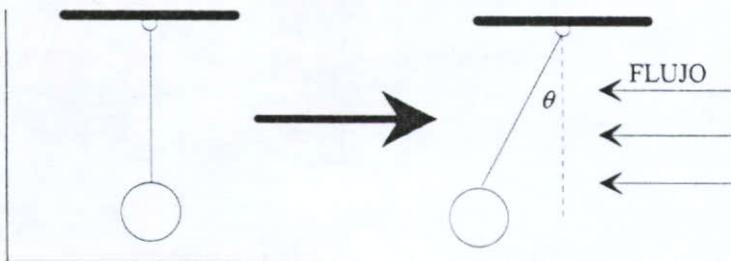


Fig. No. 33 Formación del ángulo de desfazamiento ante la presencia de flujo

## RESULTADOS.

Tabla No. 3 Recoleccion de datos de las corridas para determinar el coeficiente de arrastre.

Diámetro=		W=						
# De corrida	r.p.m.	V	T	$\theta$	$C_D$	Re	$\rho$	$\mu$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFÍA.

### B. Resultados Obtenidos

#### PRÁCTICA # 1 "TEORÍA DE MODELOS"

Utilizando la semejanza entre los coeficientes de arrastre y números de Reynolds entre modelo y prototipo, y midiendo experimentalmente se encuentra la velocidad y el ángulo de desfazamiento en cierto valor para el modelo, así pues mediante las siguientes fórmulas y sustituciones, encontramos la velocidad a la que debe trabajar el prototipo para obtener el mismo coeficiente de arrastre: (Ver Tabla No. 2)

$$C_{Dm} = C_{Dp}$$

$$Re_m = Re_p \Rightarrow \frac{V_{\infty m} D_m}{\mu_m} = \frac{V_{\infty p} D_p}{\mu_p} \quad (3.2)$$

$$\therefore V_{\infty p} = V_{\infty m} \left( \frac{\mu_p}{\mu_m} \right) \left( \frac{D_p}{D_m} \right)$$

$$V_p = \left( \frac{0.05}{0.14} \right) (3.556) = 1.27 \text{ m/s}$$

Con la velocidad del prototipo calculada, se obtiene de la gráfica del Anexo No. 2 la velocidad requerida en el eje del motor en r.p.m., y con los coeficientes de arrastre igualados, se procede a despejar el ángulo teórico que se deberá desfazar:

$$C_{Dm} = \frac{8W \tan \theta}{\rho V_{\infty}^2 \pi D^2} = C_{Dp} = \frac{8W \tan \theta}{\rho V_{\infty}^2 \pi D^2}, \text{ por lo tanto:}$$

$$\tan \alpha_p = \left( \frac{W_m}{W_p} \right) \left( \frac{V_p}{V_m} \right)^2 \left( \frac{D_p}{D_m} \right)^2 \tan \alpha_m = \left( \frac{0.03}{0.265} \right) \left( \frac{1.27}{3.556} \right)^2 \left( \frac{0.14}{0.05} \right)^2 (0.516) = 0.05842$$

$$\therefore \alpha = 33^\circ$$

Tabla No. 4 Datos físicos medidos y despeje para el cálculo de operación del prototipo.

Dmodelo(m)=	0.05	Vmodelo (m/s)=	3.556
Dprototipo(m)=	0.14	Vprototipo(m/s)=	1.27
Wmodelo(N)=	0.03	Vprototipo(ft/min)=	250
Wprototipo(N)=	0.265	De la gráfica (r.p.m.)	970
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )=	1.347	C <sub>D</sub> modelo=	0.9257207
$\mu$ (m <sup>2</sup> /s)=	1.51E-05	C <sub>D</sub> prototipo ideal=	0.925720671
		Tan $\alpha_p$ =	0.058415094
		$\alpha_p$ =	3.343139196

Enseguida se procedió a fijar el motor a las revoluciones indicadas, y a medir los catetos que forman el ángulo de desfazamiento para el prototipo, obteniéndose los siguientes valores:

Tabla No. 5 Lecturas tomadas físicamente en el prototipo.

# lectura	Cat. Opuesto	Cat. Adyacente	Tan $\alpha$	$\alpha_{real}$	CD prototipo real
1	1.2	14	0.085714286	4.899092	1.35833875
2	1.5	18	0.083333333	4.763642	1.32060712

Notándose un error relativo de medición de tan solo:

Tabla No. 6 Errores de medición relativos respecto al real.

$\alpha_{real} - \alpha_{ideal} / \alpha_{real}$
31.7%
29.83%

## PRÁCTICA # 2 “VISUALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS DE FLUJO”

La decisión respecto a la selección del tipo de humo a emplear no es fácil, ya que el humo debe ser no tóxico, no corrosivo, y que no condense. Debe ser seguro y de fácil generación, para propósitos de señalización y fines militares son empleados generadores de humo que es tóxico, y que ciertamente producen grandes volúmenes de humo, pero que definitivamente no son recomendados para emplearse en lugares cerrados.

Las características del humo a emplear dependerán de las condiciones que prevalezcan en el túnel de viento, tales como luminosidad, ventilación, etc. El método más común de producción de humo para visualización dentro de túneles de viento, es mediante la vaporización de algún aceite mineral.

Otra posibilidad es la visualización con pompas de jabón, las cuales pueden ser producidas sencillamente mediante la mezcla de algún detergente en abundancia y glicerina. Así pues se construye un círculo de aproximadamente media pulgada de diámetro, y se

sumerge en la mezcla, después se sostiene frente al flujo normal de aire. La velocidad del flujo debe ser ajustada de tal manera que las burbujas prevalezcan hasta llegar al modelo

En nuestro caso particular las prácticas de prueba fueron hechas quemando aceite que se vende en la tiendas de electrónica para generar humo en las discotecas que da apariencia de ser aceite de coco, el cual produce el humo suficiente requerido y no presenta ningún riesgo de explosión o intoxicación.

Las pruebas se hicieron con dos perfiles distintos, primero se tomó una esfera de unicel de 20 cm. de diámetro, se aplicó resistol 5000 sobre cierta área, la que sería la punta de la esfera en la dirección del flujo, y se adhirieron partículas que hicieran más rugosa la superficie.

Se fijó la esfera de un hilo de aproximadamente 15 cm. de largo. Se virtió el aceite sobre una pequeña cacerola, y se fue aumentando gradualmente la velocidad del ventilador hasta que se observaron las líneas de corriente dibujarse alrededor de la esfera. Ver fotografías en Anexos.

Posteriormente se fijó una placa plana de madera perpendicular al flujo, en donde se alcanza a observar que en cuanto incide el humo en la superficie dibuja las líneas de corriente separándose inmediatamente. Ver fotografías en Anexos.

### PRÁCTICA # 3 “DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE”

Esta práctica se efectuó para dos distintas formas de esferas, para poder observar la influencia de la rugosidad de la superficie en la obtención del coeficiente de arrastre.

Primero se introdujo una esfera de unicel con las siguientes características:

---

---

Tabla No. 7 Características de la esfera de unicel con la que fue hecha la práctica.

T=	20°C
----	------

W (N)=	0.03
$\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )=	1.347
$\mu$ (m <sup>2</sup> /s)=	1.51E-05
Diámetro (m)=	0.05

Enseguida se procedió a registrar los valores de los catetos que forman el ángulo de desfazamiento con sus respectivas velocidades registradas en el eje del motor (r.p.m.). Con dichas velocidades se consultó en la gráfica de r.p.m. vs. FPM del Anexo No. 2 y se obtuvieron las velocidades en la zona de trabajo, y se tabularon de la siguiente manera:

Tabla No. 8 Valores registrados en los distintos valores de r.p.m. del motor.

Cat. Opuesto	RPMmotor	Cat. Adyacente	Angulo	Vzona trabajo <sub>(fpm)</sub>
0.8	746	15.5	2.954579824	195
1.5	994	15.5	5.527540152	270
1.8	1036	15.5	6.624032635	280
2.5	1162	15.5	9.162347046	310
2.8	1204	15.5	10.23977463	350
3.5	1270	15.5	12.72435569	380
4	1378	15.5	14.4702941	430
5	1428	15.5	17.8786966	460
6.5	1593	15.5	22.75097634	595
7	1615	15.5	24.30454927	610
8	1723	15.5	27.29957221	700

Una vez obtenida la velocidad en la zona de trabajo, se procedió a calcular los coeficientes de arrastre y los números de Reynolds para cada valor de velocidad del eje tabulada, obteniéndose la siguiente tabla:

Tabla No. 9 Obtención de los coeficientes de arrastre a partir de las velocidades registradas.

Tangente( $\alpha$ )	Vzona trabajo <sub>(m/s)</sub>	Re	C <sub>D</sub>
----------------------	--------------------------------	----	----------------

0.051612903	0.9906	3.28E+03	1.193205939
0.096774194	1.3716	4.54E+03	1.166966456
0.116129032	1.4224	4.71E+03	1.302120224
0.161290323	1.5748	5.21E+03	1.475405041
0.180645161	1.778	5.89E+03	1.296333023
0.225806452	1.9304	6.39E+03	1.374660624
0.258064516	2.1844	7.23E+03	1.22692417
0.322580645	2.3368	7.74E+03	1.340136337
0.419354839	3.0226	1.00E+04	1.041295681
0.451612903	3.0988	1.03E+04	1.066922839
0.516129032	3.556	1.18E+04	0.925952159

Para finalmente obtener la gráfica de r.p.m. vs.  $C_D$  registrados experimentalmente. Ver Anexo No. 3

Para poder observar la influencia de la rugosidad de la superficie en la determinación del coeficiente de arrastre, se repitieron los procedimientos anteriores, pero empleando una pelota de ping pong, cuya superficie es mas lisa, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla No. 10 Datos registrados a diferentes velocidades del motor para la esfera lisa.

T=	20°C			
W (N)=	0.02158			
$\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )=	1.347			
$\mu$ (m <sup>2</sup> /s)=	1.51E-05			
Diámetro (m)=	0.037			
Cat. Opuesto	RPMmotor	Cat. Adyacente	Angulo	Vzona trabajo <sub>(fpm)</sub>
0.5	664	15	1.90915243	170
0.8	929	15	3.05288251	240
1	1160	15	3.81407483	320
1.5	1282	15	5.71059314	370
2.1	1450	15	7.96961039	470
2.8	1564	15	10.5735234	560
3.5	1698	15	13.1340223	680

Tabla No. 11 Obtención del coeficiente de arrastre para la pelota lisa.

Tangente( $\alpha$ )	Vzona trabajo(m/s)	Re	$C_D$
0.033333333	0.8636	2.12E+03	1.33190727
0.053333333	1.2192	2.99E+03	1.06922556
0.066666667	1.6256	3.98E+03	0.75179922
0.1	1.8796	4.61E+03	0.84350884
0.14	2.3876	5.85E+03	0.73185561
0.186666667	2.8448	6.97E+03	0.68735929
0.233333333	3.4544	8.46E+03	0.58270943

En las cuales se pudo observar una notable diferencia de comportamiento, teniendo esta última mayor estabilidad a números de Reynolds más altos.

Observe la gráfica obtenida en el Anexo No. 4

## CONCLUSIONES

El contar con un elemento de experimentación como el anteriormente desarrollado permite la adecuada visualización de las líneas de flujo que provocan la sustentación de los modelos, lo cual ayuda al estudiante de ingeniería a entender los mecanismos de sustentación empleados por la aviación moderna.

Con este túnel se pone de manifiesto la necesidad de corroborar de una manera práctica los conocimientos aprendidos en las aulas, antes de enfrentarse al desempeño de la vida profesional, de tal manera que sean lo mas apegados posible a la realidad.

En este túnel se logró el objetivo de visualizar teorías y leyes asimiladas en el transcurso de la carrera de ingeniería, como lo fueron el desprendimiento de capa limite, las teorías de modelos y prototipos con sus respectivas leyes de semejanzas, y varios fenómenos en que se emplea prácticamente la ecuación de Bernoulli para su explicación y otras mas.

Es importante se haga del conocimiento del estudiante la importancia de un túnel de viento en diversos factores de la vida cotidiana, como lo es la misma seguridad de las personas, y la gran ayuda que este proporciona para desarrollar y experimentar dispositivos con un gran ahorro económico y principalmente sin exponer vidas humanas.

Cabe mencionar que hasta el momento de la realización del presente trabajo de tesis, este túnel de viento para pruebas aerodinámicas de laboratorio es el único existente en las universidades de la región, con lo que se pretende obtener mayor difusión para las carreras de ingeniería en la Universidad Panamericana, estando así un paso adelante en cuanto a disposición de avances tecnológicos como elementos didácticos se refiere.

En el segundo capítulo se busca justificar cada uno de los cálculos hechos y materiales empleados en la construcción física del túnel, así como los problemas enfrentados y sus respectivas soluciones empleadas.

El propósito perseguido con el diseño de prácticas de laboratorio, es dejar una base para la implementación de las mismas en prácticas de laboratorio de los estudiantes de ingeniería. Y además dejar un precedente de su adecuado funcionamiento, demostrando que se alcanzaron los fines perseguidos. En la primera práctica desarrollada de teoría de modelos, se encontraron resultados bastante aceptables, considerando los errores de medición en que se incurre, inherentes a los practicantes. Como sugerencia para futuras prácticas, procure que la relación entre modelo y prototipo en cuanto a diámetro y peso se refiere sea tal que permita que los cálculos para determinar las condiciones de operación del prototipo no salgan fuera de rango en cuanto a aspectos de funcionamiento del túnel se refiere, como son las velocidades máxima y mínima permitidas por el ventilador. Para esto use la máxima velocidad registrada para el modelo y a partir de ésta prediga la del prototipo. Puede emplear los tamaños usados en la práctica de verificación, puesto que está confirmado su adecuado funcionamiento, además de que las esferas de unicel son fáciles de conseguir. Se utilizaron esferas, para cumplir con las semejanzas, y no tener que preocuparse por localizar y ubicar exactamente dentro del túnel los puntos homólogos.

Las prácticas de visualización de flujo resultaron bastante satisfactorias, en éstas se puede observar claramente la diferencia y ventajas que presenta un perfil fuselado contra otro normal, así como los remolinos que se forman en la parte trasera de una placa perpendicular al flujo por la diferencia de presiones. Y por último el retardamiento del desprendimiento de capa límite para una esfera circular. Para mejor comprobación observe las fotos contenidas en los anexos.

Las prácticas de coeficiente de arrastre se hicieron para dos distintas formas de esferas para comprobar las influencia de la rugosidad de la superficie en la determinación del coeficiente de arrastre. Las gráficas resultantes se observan en los anexos tres y cuatro. En estas gráficas existe un desplazamiento de la curva respecto de la ideal, debido a la rugosidad

de la superficie de las esferas. Los resultados fueron bastante satisfactorios considerando que es muy subjetivo que tan “lisa” deberá ser una superficie lisa para que se apegue a la gráfica.

El método empleado para la detección de la velocidad del flujo en la zona de trabajo consistente en el diodo LM335 y su gráfica observada en el Anexo No. 1 permitió calibrar una curva que se le facilitará al alumno para el cálculo y la elaboración de sus prácticas. Este dispositivo representa la ventaja de ser fácil de construir y mucho más económico que cualquier otro dispositivo comercial de medición de flujo, además de incluir en su construcción los conocimientos adquiridos en materias como electrónica, medición e instrumentación y dinámica de sistemas físicos.

Con el manual de operaciones se busca que los usuarios del túnel así como los encargados del mismo dispongan de herramientas para su adecuado conocimiento y funcionamiento, y de alguna manera logren entender la aplicación y funcionamiento de cada uno de los componentes. Se encuentra elaborado en un lenguaje entendible aún a nivel técnico. De igual manera se hacen recomendaciones a nivel general por cuestiones de seguridad en la operación.

Este proyecto tiene como valor agregado el incentivar la inquietud de los estudiantes de ingeniería a desarrollar nuevos proyectos que enriquezcan sus conocimientos y a la vez aporten bases para otras generaciones de ingenieros. Es decir, se pretende dejar la base para que desarrollen modificaciones o avances en el túnel, los cuales podrían ser: diseñar e implementar un nuevo tipo de ventilador, con alabes más eficientes o en mayor número de ellos, diseño de perfiles aerodinámicos en los cuales su mecanismo de sujeción permita variar el ángulo de ataque, y observar los efectos de éste para una adecuada sustentación, por dar algunos ejemplos.

Igualmente se hace un llamado a los directores y coordinadores de la carrera de ingeniería a que fomenten el desarrollo de proyectos similares entre sus pupilos, y los apoyen para conseguir patrocinios; es sumamente reconfortante para el alumno ver aplicados los

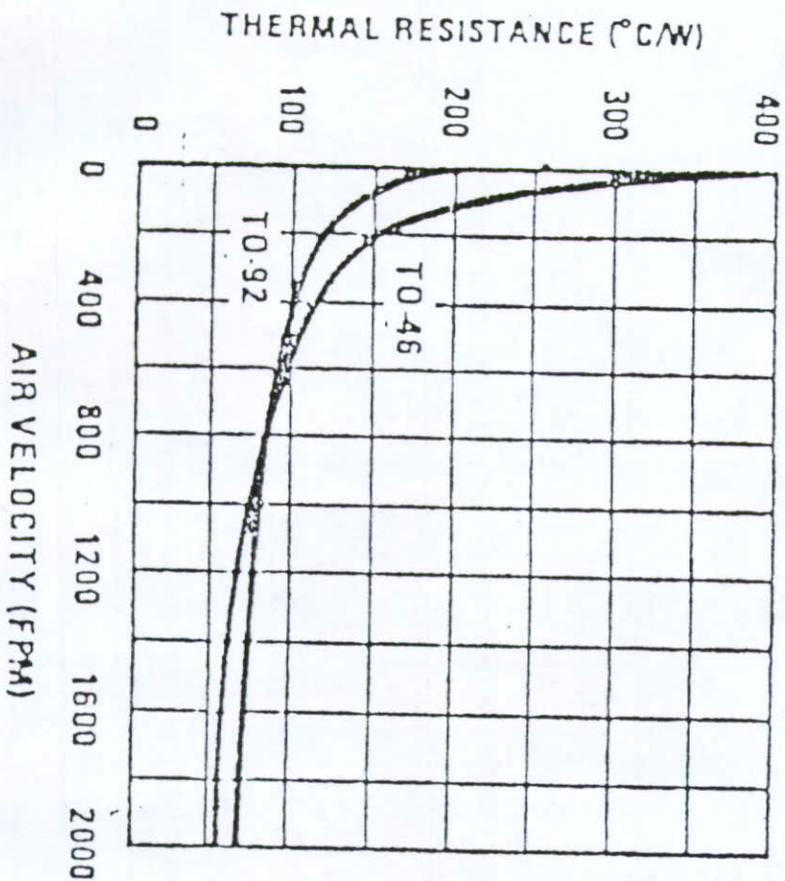
conocimientos adquiridos a lo largo de una dura carrera universitaria culminados en un proyecto trascendente.

Es momento de proyectarse al futuro y demostrar a los empresarios e industriales mexicanos que pueden confiar en las universidades del país para el desarrollo de sus proyectos, tal como lo hacen los países del primer mundo, que pueden confiar en los conocimientos que aquí son impartidos.

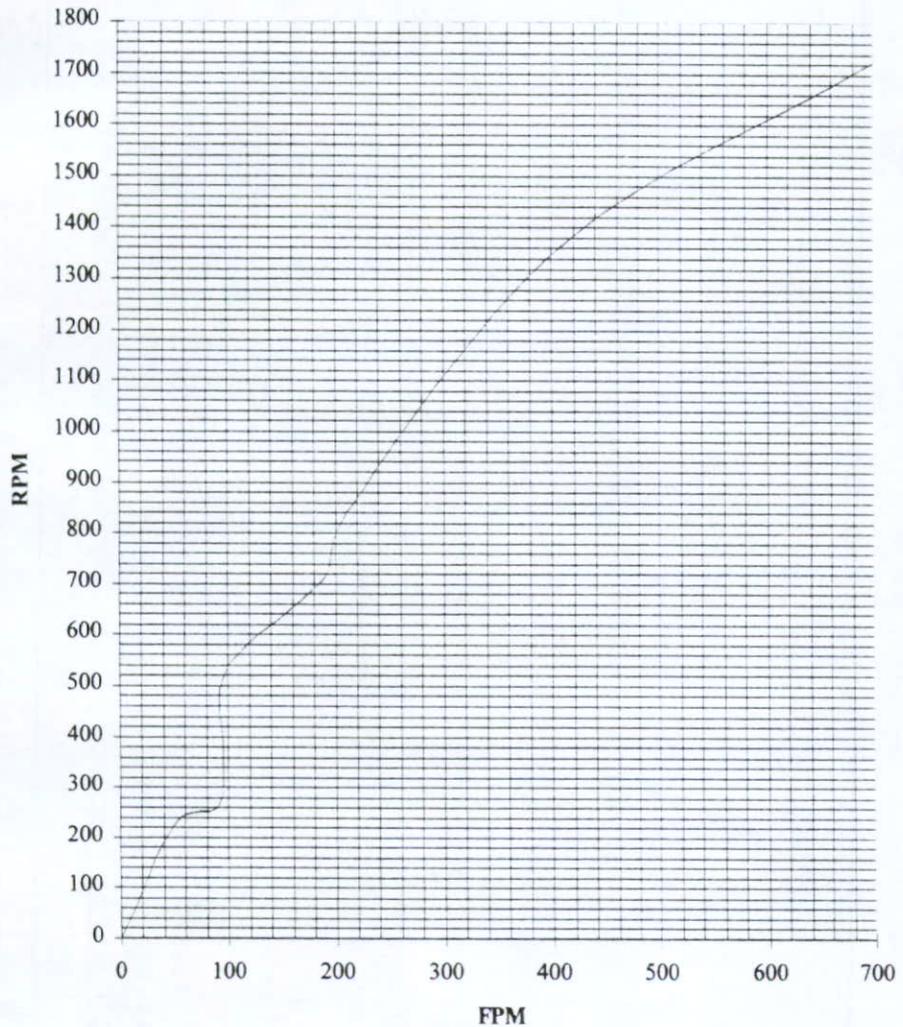
## BIBLIOGRAFÍA

- CLANCY, L. J., Aerodynamics, Pitman Publishing 1975.
- DOUGLASS, M. Considine, Manual de Instrumentación Aplicada, S.D. Ross Editores, Ed. CECSA, 227 p.
- GERHART, Philip/ GROSS, Richard/ HOCHSTEIN, John, Fundamentos de Mecánica de Fluidos, 2a. ed.; Ed Addison-Wesley Iberoamericana, 649 p.
- GOLDEN/ BATRES/ TERRONES, Termofluidos y Turbomaquinaria; Ed. CECSA
- MARKS, Lionel S./ BAUMESITER, Baumeister. Manual de Ingeniería Mecánica de Marks, Unión Tipografía, Ed. Hispanoamericana, 1683 p.
- MATAIX, Claudio, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, 2a. ed; Ed. HARLA
- Mc GRAW-HILL, Encyclopedia of Science and Technology, Ed. Mac Graw-Hill, Tomos I y XIV 576 p.
- NATIONAL, Manuales de Semiconductores
- SHAMES, Irving H. Mecánica de Fluidos, 3a. ed; Ed. Mc Graw-Hill
- STREETER, Victor L./ WYLIE, E. Benjamin, Mecánica de los Fluidos, 8a. ed. (3a. en español); Ed. Mc Graw-Hill, 162 p.
- VENNARD, John K./ STREET, Robert L., Elementos de Mecánica de Fluidos, Versión SI, Cía. Editorial Continental S.A. de C.V. México 714 p.
- VUELO, Enciclopedia de la revista TIME.

# Thermal Resistance Junction to Air

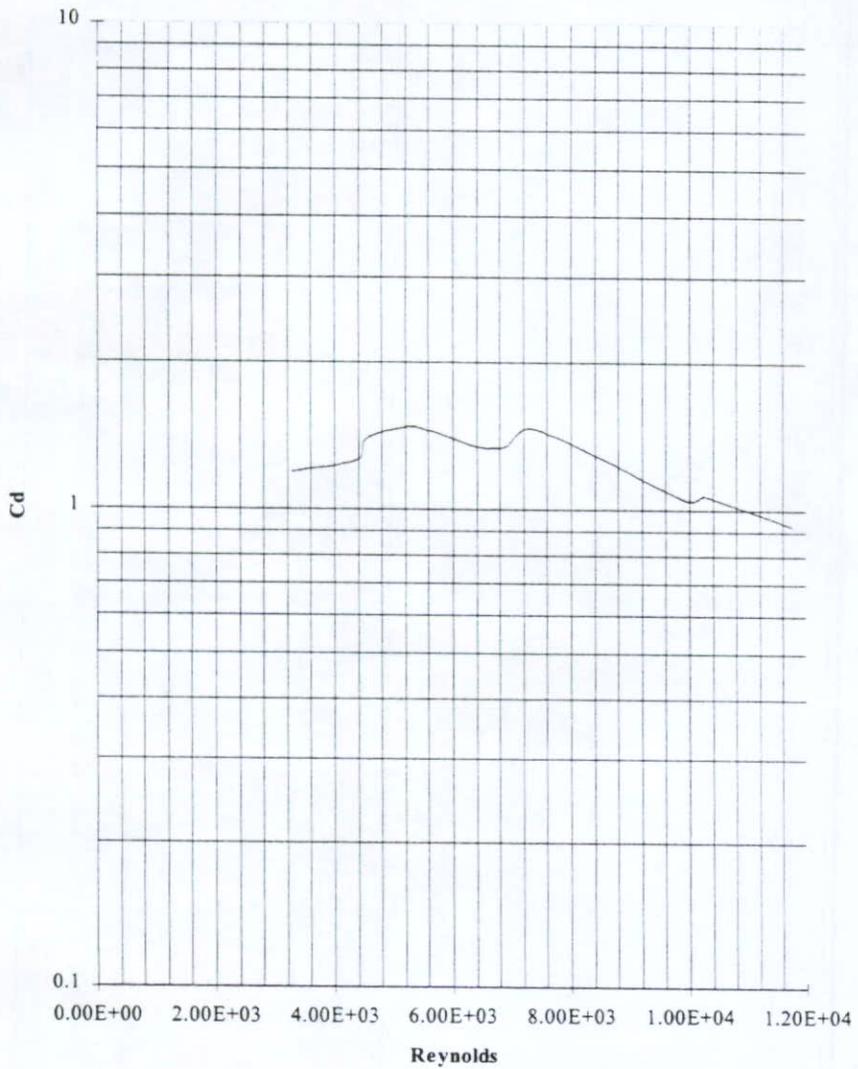


### Gráfica de RPM del motor vs. FPM en la zona de trabajo



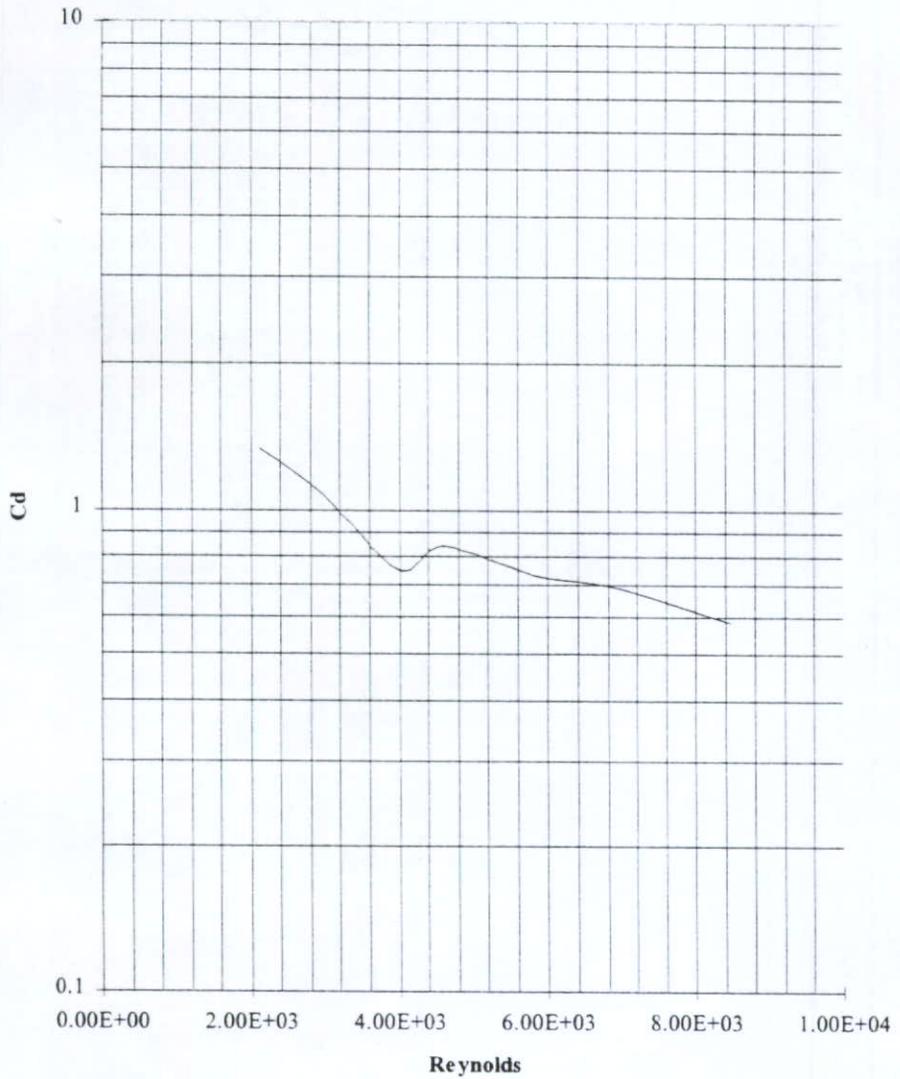
Anexo No. 2

### Gráfica de $C_d$ para una esfera rugosa



Anexo No. 3

### Gráfica de Cd para una esfera lisa.



Anexo No. 4

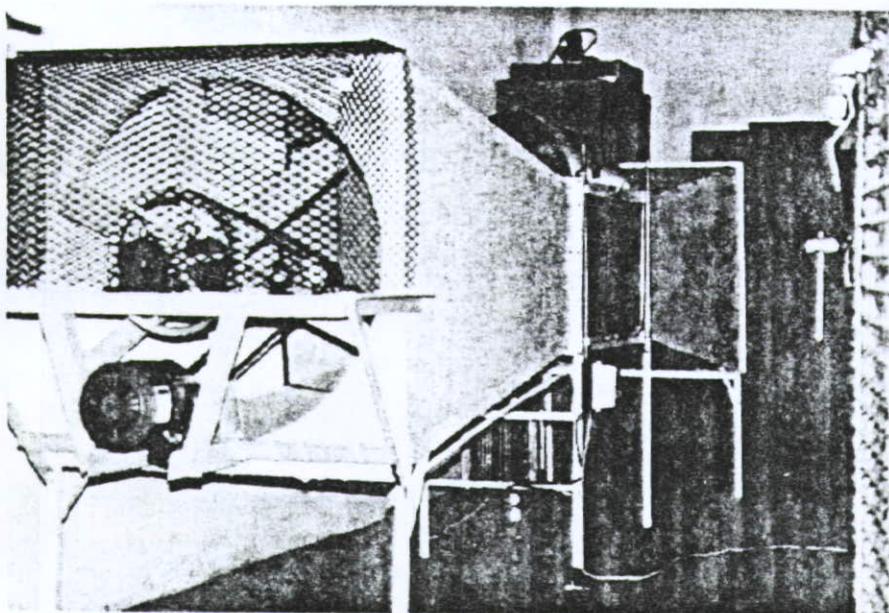


Foto No. 1 Vista General del túnel de viento.

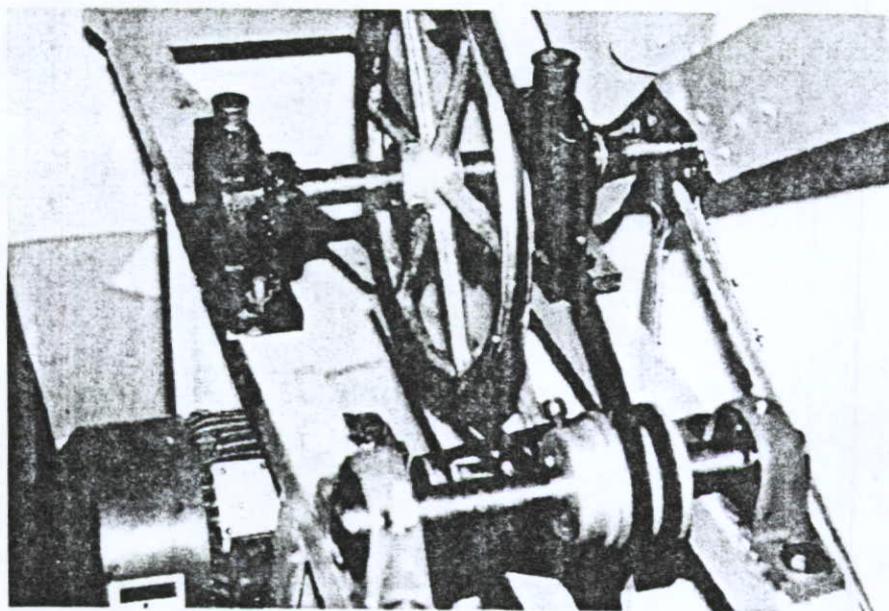


Foto No. 2 Mecanismo de transmisión de potencia.

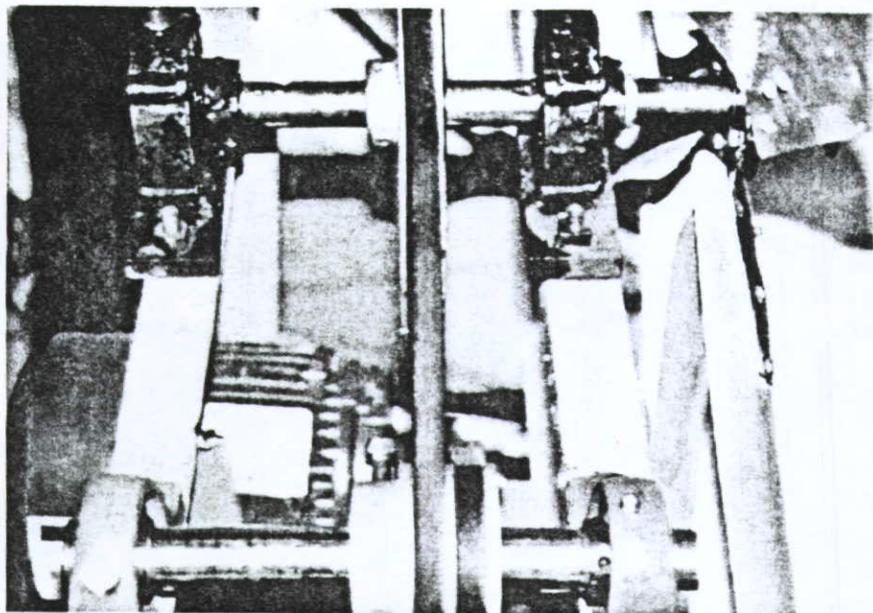


Foto No. 3 Vista lateral del mecanismo de transmisión de potencia.

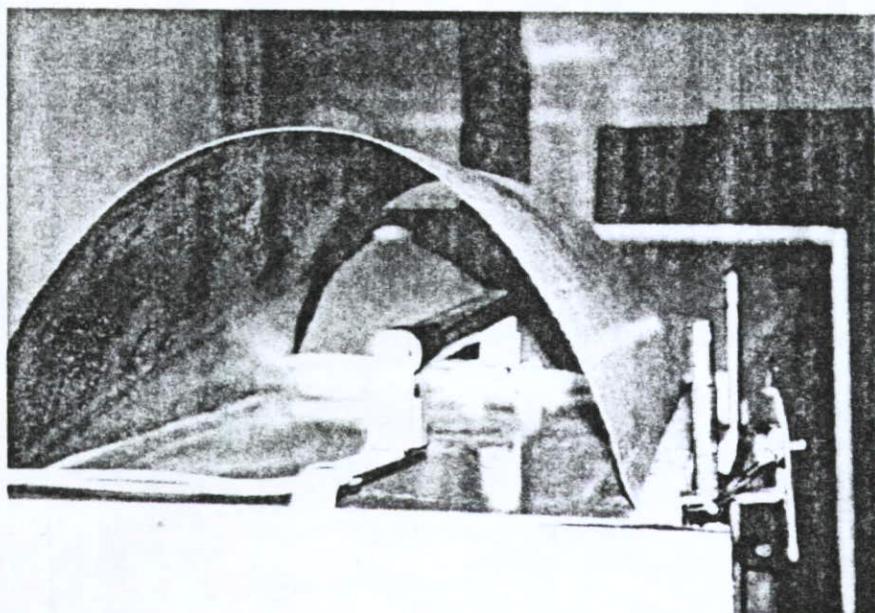


Foto No. 4 Sistema de iluminación a base de luz fluorescente negra.

54719.

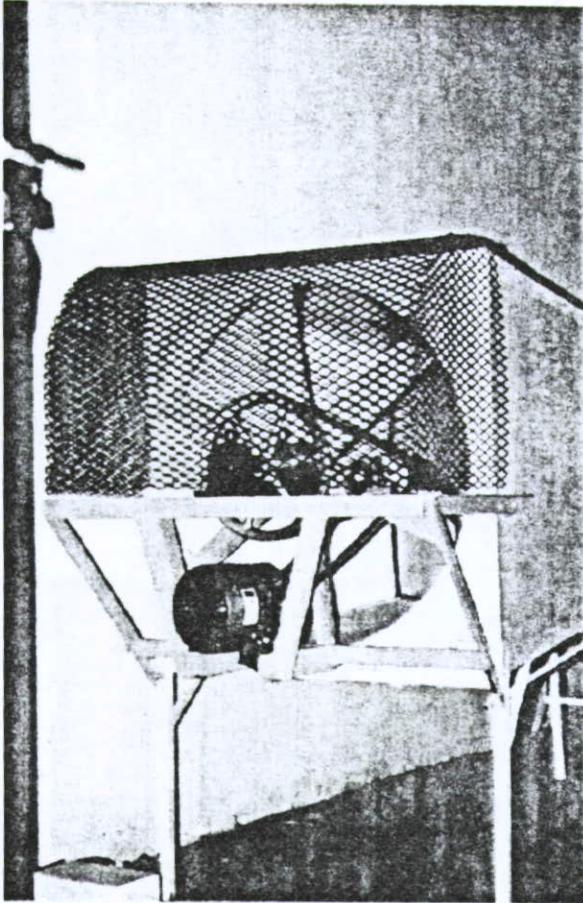


Foto No. 5 Coraza Protectora del sistema generador del flujo.

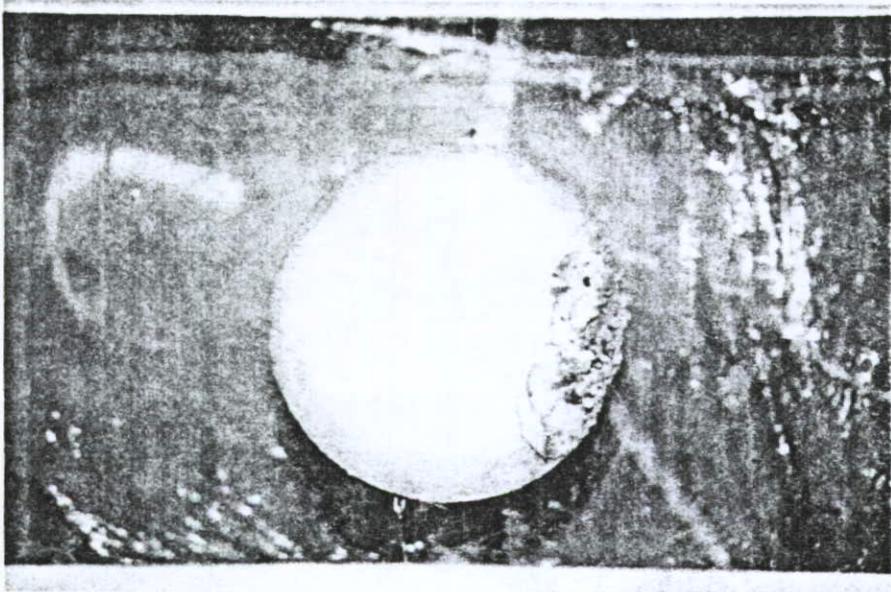
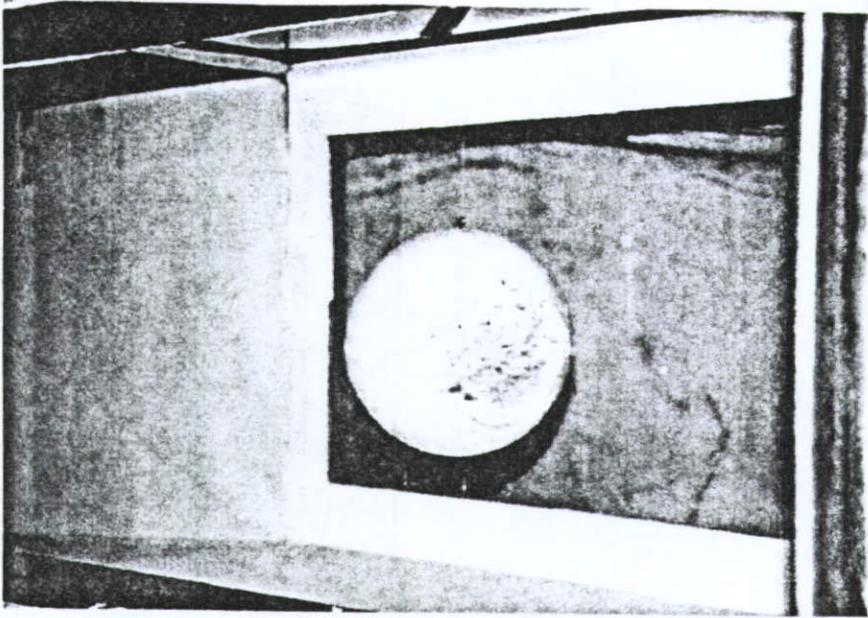


Foto No. 6 y 7 Visualización de líneas de flujo en una esfera con superficie rugosa.

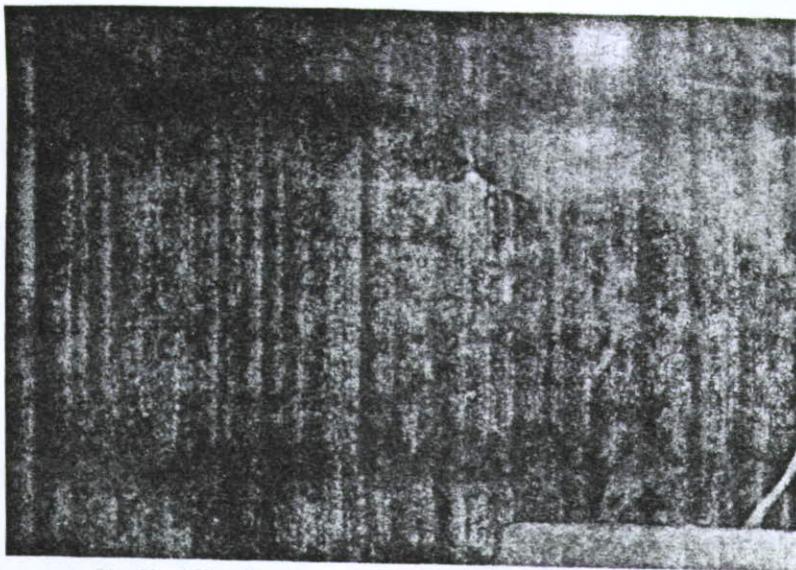


Foto No. 8 Visualizaci3n de lneas de flujo en un perfil no fuselado.

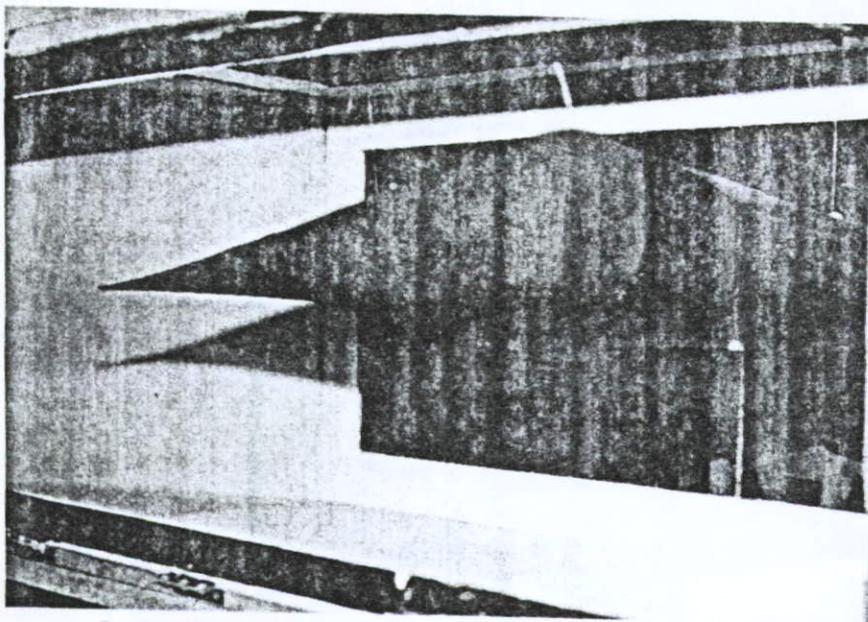


Foto No. 9 Montaje de un perfil fuselado para pruebas de visulaizaci3n de flujo.

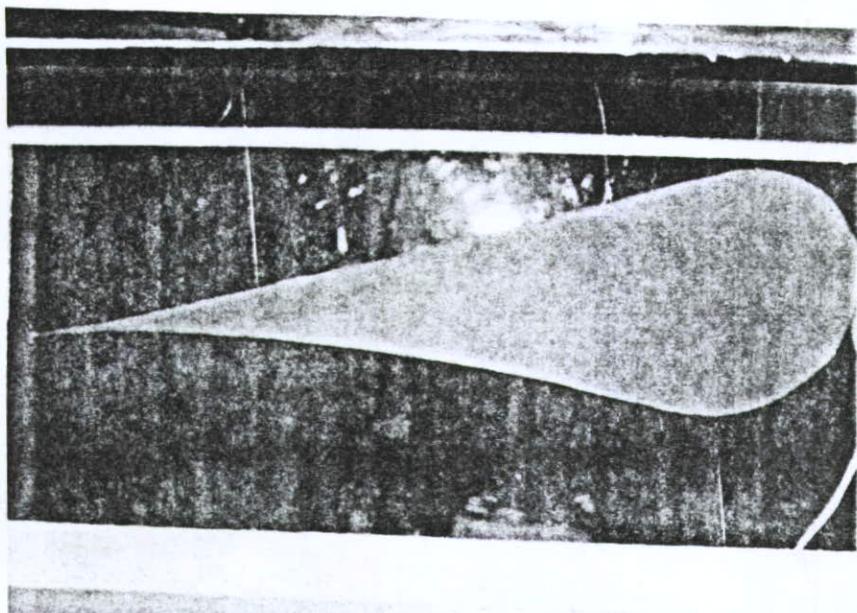


Foto No. 10 Perfil fuselado vista lateral.

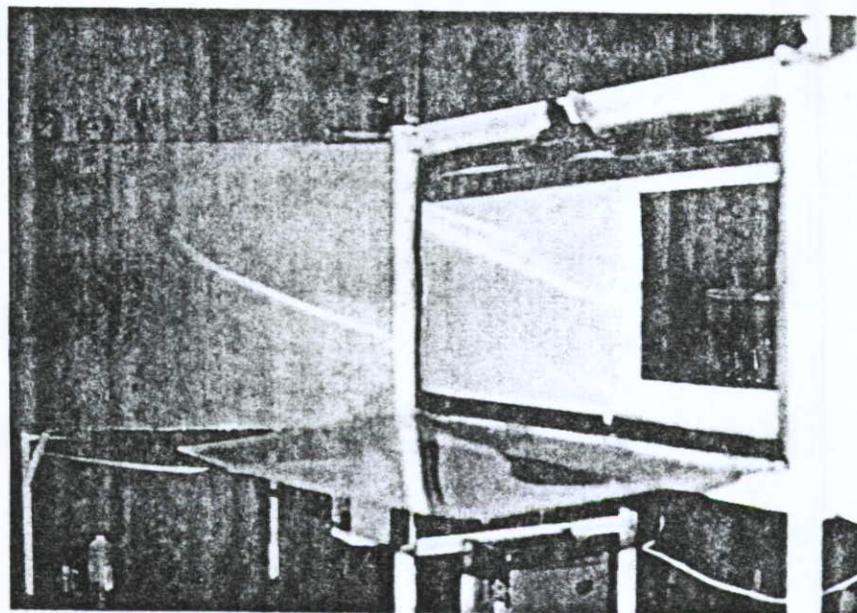


Foto No. 11 Acceso a la sección de trabajo.

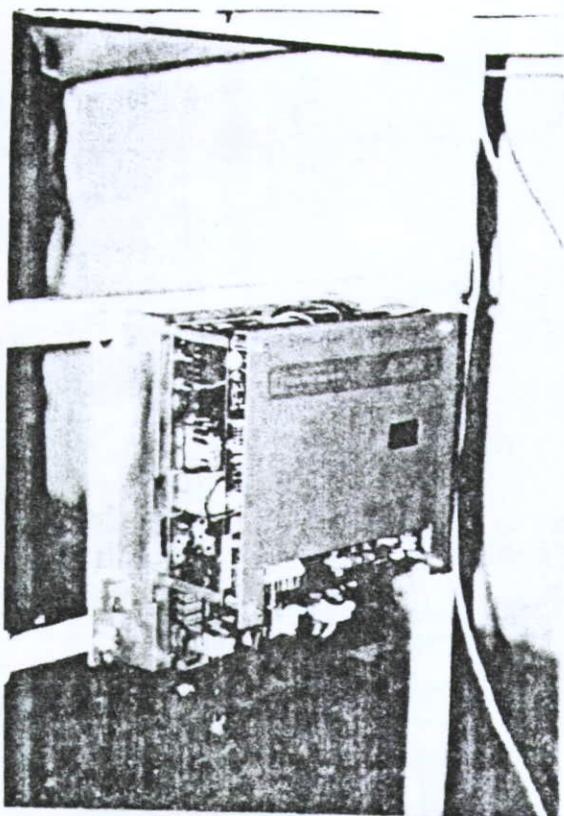


Foto No. 12 Mecanismo de variación de velocidad.

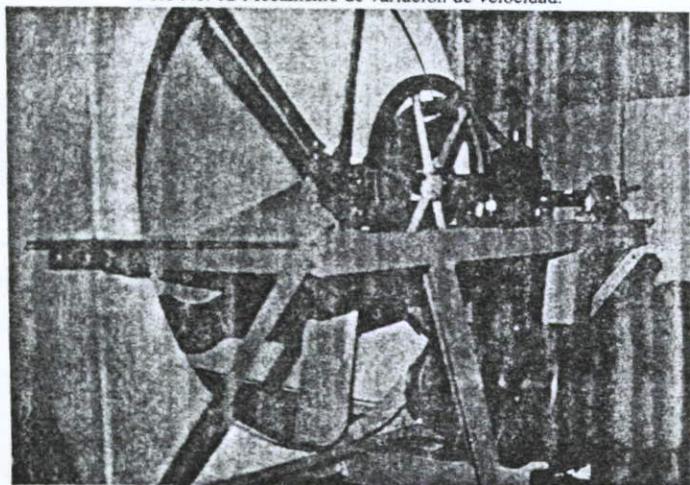


Foto No. 13 Acercamiento de la salida del difusor.



ESTACIONAMIENTO SOLO PARA NUESTROS CLIENTES

**NADIE COMPITE CON NUESTRA CALIDAD DE  
IMPRESION Y TIEMPO DE ENTREGA, COMPRUEBELO!**

**NO TENEMOS SUCURSALES**

**TESIS PROFESIONALES**

TESINAS • MEMORIAS • INFORMES  
**8 DE JULIO No. 13**  
(ENTRE PEDRO MORENO Y MORELOS)

TELS. **614-01-22**  
**613-61-42**

**GUADALAJARA, JAL.**

PASAMOS TUS TESIS  
EN MAQUINA IBM



**copi • offset**  
(TIROS CORTOS AL INSTANTE)