



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

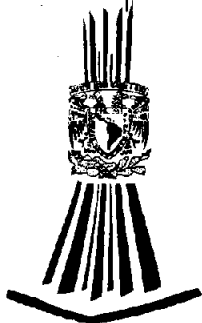
“ESTUDIO TEÓRICO DE UN TÚNEL DE
VIENTO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO
ELECTRICISTA
ÁREA: MECÁNICA

P R E S E N T A :
MINERVA SEGURA RAUDA

ASESOR:
ING. JORGE ANTONIO RODRÍGUEZ LUNA



FES Aragón

MÉXICO, D.F.

2005

17352615



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ANÁLISIS DIMENSIONAL	5
1. DIMENSIONES	6
2. UNIDADES (sistema SI y sistema inglés)	8
3. PARÁMETROS ADIMENSIONALES	10
3.1. UTILIZACIÓN PRÁCTICA DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES	14
3.2. TEOREMA II DE BUCKINGHAM	15
CAPÍTULO II. MODELOS Y SEMEJANZAS	17
1. MODELO	17
2. TEORÍA DE LOS MODELOS (leyes de la semejanza)	19
3. SEMEJANZA	20
4. SIMILITUD FÍSICA	21
4.1. SIMILITUD GEOMÉTRICA	22
4.2. SIMILITUD CINEMÁTICA	23
4.3. SIMILITUD DINÁMICA	24
4.3.1. RELACIONES DE FUERZAS QUE SE PRESENTAN EN LA SIMILITUD DINÁMICA (los parámetros adimensionales)	26
4.3.2. APLICACIÓN DE LA SIMILITUD DINÁMICA	36
CAPÍTULO III. TÚNEL DE VIENTO	42
1. DEFINICIÓN	42
2. OBJETIVO DE LOS TÚNELES	43
CAPÍTULO IV. TIPOS DE TÚNELES	44
1. SEGÚN LA VELOCIDAD DEL AIRE	44
2. SEGÚN EL TIPO DE CIRCULACIÓN	46
3. TIPOS ESPECIALES	51

CAPÍTULO V. CONSTITUCIÓN DE LOS TÚNELES 54
1. PARTES CONSTITUTIVAS 54
2. SELECCIÓN DEL TIPO Y DIMENSIONES DEL TÚNEL 63
2.1. DIMENSIONES SEGÚN EL ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO 63

CAPÍTULO VI. MECANISMOS E INSTRUMENTAL 65
1. MECANISMOS 65
1.1. CONTROLES ELÉCTRICOS DEL TÚNEL 66
1.2. MÉTODOS DE MOVER LA HÉLICE DEL VENTILADOR 67
2. INSTRUMENTAL 69
2.1. CALIBRACIÓN DEL FLUJO EN EL TÚNEL 74
2.1.1. EQUIPO 74
2.1.2. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN 76
2.2. MEDICIONES EN MODELOS 80
2.2.1. INSTRUMENTOS NECESARIOS 80

CAPÍTULO VII. APLICACIONES 82
1. TRABAJOS QUE PUEDEN REALIZARSE EN UN TÚNEL DE VIENTO 82
2. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN CURSO 83

CONCLUSIONES 84

BIBLIOGRAFÍA 86

INTRODUCCIÓN

La Mecánica de Fluidos es una disciplina que estudia el movimiento de los líquidos y los gases, su dinámica, las velocidades, las presiones. En particular, uno de los fluidos que estudia es el aire, y el viento no es más que el movimiento de las masas de aire en la atmósfera. Las herramientas con que se cuenta para estudiar el movimiento de esos fluidos son diversas. Dada la complejidad que tienen las ecuaciones, las leyes físicas que rigen su movimiento, ese estudio se hace en general a través de modelaciones numéricas o físicas. En particular, la modelación física en el túnel de viento, es decir la copia de la realidad en forma física.

Un túnel de viento básicamente es un ducto, digamos que un caño, de dimensiones transversales grandes (una sección recta de dos metros por dos), a través del cual se puede hacer circular aire, y donde se puede simular¹ y controlar las características de los flujos.

El uso de túneles de viento en el mundo se remonta a principios del siglo, se puede decir, con las primeras experiencias en el intento de diseñar máquinas que volaran. Los hermanos Wright² usaban un túnel de viento accionado por una bicicleta. El uso civil, para el estudio de fenómenos en la naturaleza, es relativamente novedoso: tiene no más de 40 años en el mundo.

En la medida en que se cuenta con una instalación con mayores distancias, se puede hacer modelos más grandes, trabajar con mayores velocidades; es factible

¹ Hacer parecer como real algo que no lo es.

² ORVILLE WRIGHT (1871-1948). Nació en Dayton el 19 de agosto de 1871. Entre sus aportaciones individuales al progreso de la aviación se encuentra el desarrollo del primer túnel de viento en 1901.

Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2003. © 1993-2002 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

reproducir la realidad con mayor fidelidad. De esa manera es posible el estudio de una cantidad más variada de procesos.

En la solución de problemas de ingeniería relacionada con el movimiento de un fluido, se reconoce en el modelo reducido una técnica de investigación muy útil, no solo por su economía en el costo y en el tiempo de observación, sino también porque permite un control cuidadoso de las variables individuales que intervienen en el fenómeno, para después extrapolar los resultados y conclusiones al funcionamiento de la estructura real.

Los principios de operación del modelo varían con el efecto primario que se desea simular, el cual depende de la importancia que adquieran las propiedades del fluido dentro del fenómeno en estudio. Así, en Hidráulica es generalmente la acción de la gravedad (peso específico) la que gobierna la función del modelo, y de ella dependen las diferentes escalas de longitud, tiempo y fuerza. En Aeronáutica es la influencia de la viscosidad la que predomina, si se exceptúa el flujo supersónico, en que es la compresibilidad del fluido (densidad) la más importante. En problemas de Combustión Interna o transferencia de calor son predominantes las características térmicas del flujo.

Cuando se considera uno solo de los efectos, son relativamente sencillos los problemas de operación del modelo y de la interpretación de resultados. Dos de los efectos pueden ser manejados simultáneamente, si bien no con la misma facilidad. La consideración del conjunto de tres y cuatro efectos resulta muy completa, sobre todo cuando la experimentación se realiza utilizando como único fluido el agua. Se ha utilizado con ventaja el aire como fluido circulante en un modelo. En un principio las aplicaciones se limitaron a problemas de conductos sometidos a presión, como tuberías, turbinas, etc. Actualmente las aplicaciones se han ampliado hasta el estudio de problemas tan arduos como los de la Meteorología, para lo que es necesario considerar la combinación de los cuatro efectos importantes.

En el estudio de la mecánica de fluido se hace gran énfasis en el hecho de que los fluidos más abundantes en la naturaleza (aire y agua) se comportan de acuerdo con las mismas leyes fundamentales del movimiento. Esto significa que la similitud se satisface con ambos fluidos; se citan como evidencia las pruebas frecuentes del empuje de cuerpos bajo el agua efectuadas en el túnel de viento. La utilidad de esta técnica de experimentación en la Mecánica de Fluidos ha sido frecuentemente comprobada, y en los laboratorios modernos el túnel de viento es una herramienta esencial en la investigación.

Se pueden enumerar cinco ventajas importantes que, por sí solas, sugieren el uso de aire en vez de agua para resolver experimentalmente algunos problemas de Mecánica de Fluidos. Estas son:

- 1) Debido a la baja densidad del aire (aproximadamente ochocientas veces menor que la del agua), los requerimientos estructurales de la conducción y del propio modelo son mínimas.
- 2) Por la misma razón, las demandas de potencia para hacer circular el aire se reducen considerablemente.
- 3) La estanqueidad absoluta de un conducto de aire no es tan importante como en el agua, esto es, en conductos de aire no existen problemas de humedad y fugas.
- 4) Con la atmósfera sirviendo como fuente inagotable de abastecimiento, no son necesarios el almacenamiento y la conducción del aire. Se eliminan los costos de construcción de cárcamos y tanques de carga constante.
- 5) Muchas fases de instrumentación se simplifican considerablemente, y las técnicas de visualización de los fenómenos son más simples.

Aparentemente, en la solución de problemas hidráulicos, a estas ventajas se oponen los efectos de las tres principales características de los líquidos que las distinguen de los gases: el módulo de elasticidad relativamente alto, la tendencia a la discontinuidad cuando se alcanza la presión de vaporización, y la propiedad de

mantener una superficie libre. Parecería que el aire no puede reemplazar al agua para propósitos experimentales y bajo condiciones que incluyan los efectos de compresibilidad, cavitación o atracción gravitacional; sin embargo, no es enteramente el caso. Por una parte, el aire puede alcanzar velocidades hasta de 150 m/s sin que se manifiesten los efectos de su compresibilidad. Por otra, el estudio del efecto de cavitación real requiere obviamente el uso del agua; pero, las pruebas exploratorias en aire reducen la extensión necesaria de la investigación final y con ello un buen porcentaje del costo total de las pruebas.

Si bien la técnica de modelos con aire fue primero desarrollada en problemas Aerodinámicos, su aplicación se ha extendido a otras ramas de la Ingeniería:

- a) Hidráulica.
- b) Estructuras.
- c) Meteorología.



Pocas veces se puede obtener la solución completa de los problemas de ingeniería por sólo los métodos analíticos, y por lo general se hacen necesarios los experimentos para determinar en su totalidad el modo en el cual una variable depende de otras.

Una técnica que ha probado ser muy útil para reducir al mínimo el número de experimentos requeridos, es la rama de las Matemáticas aplicada conocida como **análisis dimensional**. Aunque no produce soluciones analíticas de los problemas, proporciona información acerca de la forma de las relaciones que conectan entre sí las variables pertinentes, y sugiere el modo más efectivo de agrupar estas variables entre sí.

El requisito de la **homogeneidad dimensional** impone condiciones sobre las cantidades implicadas en un problema físico, y así provee valiosos indicios acerca de la forma de las relaciones que conectan entre sí sus magnitudes. La búsqueda de la forma correcta de estas relaciones se conoce como el **análisis dimensional** y, aunque la aplicación de éste es muy amplia, tiene particular valor en el estudio de la Mecánica de Fluidos, porque ésta es una materia en la cual con frecuencia surgen relaciones complejas, no susceptibles de un análisis por completo teórico.

1. DIMENSIONES

Cuando hablamos de *dimensiones*, nos referimos a cantidades físicas. En Mecánica de Fluidos sólo hay cuatro *dimensiones primarias*, de las cuales derivan las demás: **Masa**, **Longitud**, **tiempo** y **Temperatura**. Las *dimensiones secundarias* son aquellas cuyas dimensiones pueden expresarse en términos de las dimensiones de las cantidades primarias. La más importante de estas dimensiones secundarias es la **Fuerza**, directamente relacionada con **Masa**, **Longitud** y **tiempo** a través de la segunda ley de Newton: $F = m a$

Dimensionalmente, $\{F\} = \{ML t^{-2}\}$.

Toda ecuación válida que relacione cantidades físicas debe ser dimensionalmente homogénea, es decir, cada término en la ecuación debe tener las mismas dimensiones.

La Longitud y el tiempo son dimensiones primarias en todos los sistemas dimensionales de uso común. En algunos sistemas, la **Masa** se toma como la dimensión primaria, en otros, la **Fuerza** es a la que se elige como tal. Hay más de una manera de seleccionar la unidad de medida para cada dimensión primaria. Dos de las más comunes son:

a) Masa [**M**], longitud [**L**], tiempo [**t**], temperatura [**T**] (**LMtT**)³

SI, que es la abreviatura oficial en todos los lenguajes para el *Système International d'Unités*⁴, es una extensión y refinamiento del sistema métrico tradicional. En el sistema de unidades SI, la unidad de **Masa** es el kilogramo (**Kg**), la

³ R. W. Fox, *Introducción a la Mecánica de Fluidos*, pág. 10.

⁴ American Society for Testing and Materials. ASMT Standard for Metric Practice. E380-89. Filadelfia: ASTM, 1989.

unidad de Longitud es el metro (**m**), la unidad de tiempo es el segundo (**s**) y la unidad de Temperatura es el Kelvin (**K**). La Fuerza es una dimensión secundaria, y su unidad, el newton (**N**), se define a partir de la segunda ley de Newton como:

$$1N \text{ es igual a } 1kg \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

En el sistema Métrico Absoluto de Unidades, la unidad de **Masa** es el gramo (**g**), la unidad de Longitud es el centímetro (**cm**), la unidad de tiempo es el segundo (**s**) y la unidad de Temperatura es el kelvin (**K**). Puesto que la fuerza es una dimensión secundaria, la unidad de Fuerza, la **dina**, se define en términos de la segunda ley de Newton como:

$$1dina \text{ es igual a } 1g \left(\frac{cm}{s^2} \right)$$

b) Fuerza [**F**], longitud [**L**], tiempo [**t**], temperatura [**T**]⁵

En el sistema de unidades inglés gravitacional, la unidad de Fuerza es la libra (**lbf**), la unidad de Longitud es el pie (**ft**), la unidad de tiempo es el segundo (**s**) y la unidad de Temperatura es el Rankin (**R**). Puesto que la **Masa** es una dimensión secundaria, su unidad es el **slug**, se define en términos de la segunda ley de Newton como:

$$1slug \text{ es igual a } 1lbf \left(\frac{s^2}{pie} \right)$$

⁵ R. W. Fox, Op. cit., pág. 11.

Dimensiones y cantidades físicas utilizadas en Mecánica de Fluidos.⁶

Cantidad	Símbolo	Dimensiones
Longitud	l	L
Tiempo	t	t
Masa	m	M
Fuerza	F	MLt^{-2}
Velocidad	V	Lt^{-1}
Aceleración	a	Lt^{-2}
Área	A	L^2
Presión	p	$ML^{-1}t^{-2}$
Gravedad	g	Lt^{-2}
Densidad	ρ	ML^{-3}
Peso específico	γ	$ML^{-2}t^{-2}$
Viscosidad dinámica	μ	$ML^{-1}t^{-1}$
Viscosidad cinemática	ν	L^2t^{-1}
Tensión superficial	σ	Mt^{-2}
Temperatura	T	T
Capacidad de calor	Cp	$L^2t^{-2}T^{-1}$
Caudal	Q	L^3t^{-1}

2. UNIDADES (sistema internacional SI y sistema ingles⁷)

Unidad, forma particular de asignar un número a una dimensión cuantitativa. Los sistemas de unidades han variado siempre de país a país, incluso después de adoptarse acuerdos internacionales.

Los ingenieros necesitan números y por lo tanto, sistemas de unidades, y esos números deben ser fiables ya que la seguridad pública está en juego.

⁶ Loc. cit.

⁷ Sistema Ingles. corresponde la unidad Británica.

Para uniformizar el sistema métrico, una Conferencia General de Pesas y Medidas celebrada en 1960, con asistencia de 40 países, propuso el *Sistema Internacional de Unidades (SI)*. (Actualmente pasamos un arduo período de transición hacia el SI.)

Dimensiones primarias en los sistemas SI y Británico.⁸

Dimensión	Unidad SI	Unidad Británica	Factor de conversión
Masa [M]	Kilogramo (kg)	Slug	1 Slug = 14.5939 kg
Longitud [L]	Metro (m)	Pie (ft)	1 ft = 0.3048 m
Tiempo [t]	Segundo (s)	Segundo (s)	1 s = 1 s
Temperatura [T]	Kelvin (K)	Rankine (°R)	1 K = 1.8 °R

Dimensiones secundarias en Mecánica de Fluidos.⁹

Dimensión	Unidad SI	Unidad Británica	Factor de conversión
Área [L ²]	m ²	ft ²	1m ² =10.764 ft ²
Volumen [L ³]	m ³	ft ³	1m ³ =35.315 ft ³
Velocidad [Lt ⁻¹]	m/s	ft/s	1ft/s=0.3048 m/s
Aceleración [Lt ⁻²]	m/s ²	ft/s ²	1ft/s ² =0.3048 m/s ²
Presión o esfuerzo [ML ⁻¹ t ⁻²]	Pa=N/m ²	lbf/ft ²	1lbf/ft ² =47.88 Pa
Velocidad angular [t ⁻¹]	s ⁻¹	s ⁻¹	1s ⁻¹ =1s ⁻¹
Energía, calor, trabajo [ML ² t ⁻²]	J=N·m	ft·lbf	1ft·lbf=1.3558 J
Potencia [ML ² t ⁻³]	W=J/s	ft·lbf/s	1ft·lbf/s=1.3558 W
Densidad [ML ⁻³]	Kg/m ³	slugs/ft ³	1slug/ft ³ =515.4 kg/m ³
Viscosidad [ML ⁻¹ t ⁻¹]	kg/(m·s)	slug/(ft·s)	1slug/(ft·s)=47.88 kg/(m·s)
Calor específico [L ² t ⁻² T ⁻¹]	m ² /(s ² ·K)	ft ² /(s ² ·°R)	1m ² /(s ² ·K)=5.98 ft ² /(s ² ·°R)

⁸ Frank M. White, *Mecánica de Fluidos*, pág. 7.

⁹ *Ibidem*, pág. 8.

3. PARÁMETROS ADIMENSIONALES

Los *parámetros adimensionales* profundizan en forma significativa nuestro entendimiento sobre los fenómenos del flujo de fluidos; en forma análoga al caso del gato hidráulico, donde la relación entre los diámetros del pistón, un número adimensional que es independiente del tamaño real del gato, determina la ventaja mecánica. Estos parámetros permiten que resultados experimentales limitados sean aplicados a situaciones que involucran dimensiones físicas diferentes y a menudo propiedades fluidas diferentes.

Al agrupar cantidades importantes en *parámetros adimensionales*, es posible reducir el número de variables y hacer que este resultado compacto sea aplicable a otras situaciones similares.

A lo largo de los años se han identificado varios cientos de grupos adimensionales diferentes, los cuales son importantes en la ingeniería. Siguiendo la tradición, a cada uno de tales grupos se le ha dado el nombre de un científico o ingeniero prominente, usualmente uno de los pioneros en su uso. Varios de ellos son tan fundamentales y ocurren con tanta frecuencia en la Mecánica de Fluidos.

Las *fuerzas* que se encuentran en los fluidos que fluyen incluyen las debidas a la *inercia*, *viscosidad*, *presión*, *gravedad*, *tensión superficial* y *compresibilidad*. La razón de cualesquiera dos fuerzas será adimensional.

Las *fuerzas de inercia* son importantes en la mayor parte de los problemas de mecánica de fluidos. La razón entre la fuerza de inercia y cada una de las otras fuerzas listadas arriba conduce a grupos adimensionales fundamentales encontrados en la Mecánica de Fluidos.

- a) En la década de 1880, *Osborne Reynolds* ingeniero británico, estudió la transición entre regímenes de **flujo laminar y turbulento** en un tubo. Él descubrió que el parámetro *Re* es un criterio mediante el cual el régimen de flujo puede determinarse:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

El **número de Reynolds** es la razón entre las fuerzas de inercia y las viscosas. Los flujos de números de *Re* "grandes" por lo general son *turbulentos*. Los flujos en los que las fuerzas de inercia son "pequeñas" comparadas con las fuerzas viscosas son característicamente flujos *laminares*.

- b) En Aerodinámica y en otras pruebas de modelos, es conveniente presentar los datos de la presión en forma adimensional. Se establece la razón:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

Donde Δp es la presión local menos la presión de corriente libre, y ρ y V son propiedades del flujo de corriente libre. Esta razón se denomina **número de Euler**, en honor a *L. Euler*, el matemático suizo que realizó gran parte de los primeros trabajos analíticos en mecánica de fluidos. Se le acredita a *Euler* haber sido el primero en reconocer el papel de la presión en el movimiento de un fluido. El número de *Eu* es la razón entre las fuerzas de presión y las de inercia. (El factor 1/2 se introduce en el denominador para producir la presión dinámica) El número de *Eu* a menudo se llama el *coeficiente de presión*, *Cp*.

En el estudio del fenómeno de cavitación, la diferencia de presión, Δp , se toma como $\Delta p = p - p_v$ donde p , ρ y V son condiciones en la corriente del

líquido, y p_v es la presión del vapor líquido a la temperatura de prueba. El parámetro adimensional resultante se conoce como el **número de cavitación**:

$$Ca = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

- c) *William Froude* fue un arquitecto naval británico. Junto con su hijo, *R. Edmund Froude*, descubrió que el parámetro:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Era significativo en flujos con efectos de superficie libre. Desarrollaron el concepto de utilizar modelos de barcos en canales y propusieron leyes de semejanza para flujos con superficie libre (resistencias de barcos, ondas superficiales, canales abiertos). Al elevar al cuadrado el **número de Froude** se obtiene:

$$Fr^2 = \frac{V^2}{gL} = \frac{\rho V^2 L}{\rho g L^3}$$

Que puede interpretarse como la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad. La longitud, L , es una longitud característica descriptiva del campo de flujo. En el caso de un flujo en canal abierto, la longitud característica es la profundidad del agua.

- d) *Moritz Weber* desarrollo las leyes de semejanza en su forma actual e introdujo el parámetro *We*. El **número de Weber** es la razón entre fuerzas de inercia y fuerzas de tensión superficial. Puede escribirse:

$$We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$$

Este número juega un papel importante solo si es de orden unidad o menor; lo que ocurre normalmente cuando la curvatura de la superficie es comparable en tamaño a la profundidad del líquido (curvas capilares, ondas de pequeña longitud y modelos hidráulicos de pequeñas dimensiones). Si We es grande, sus efectos son despreciables.

- e) En flujos de gases a altas velocidades hay cambios significativos de presión, densidad y temperatura, cambios termodinámicos. En la década de 1870, el físico austriaco *Ernest Mach* introdujo el parámetro:

$$M = \frac{V}{c}$$

Donde V es la velocidad del flujo y c es la velocidad del sonido local. Los análisis y experimentos han mostrado que el **número de Mach** es un parámetro clave que caracteriza los efectos de compresibilidad en un flujo. El número Mach puede escribirse:

$$M = \frac{V}{c} = \frac{V}{\frac{dp}{d\rho}} = \frac{V}{\frac{E_v}{\rho}}$$

ó

$$M^2 = \frac{\rho V^2 L^2}{E_v}$$

El cual puede interpretarse como la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas debidas a la compresibilidad. Para flujo verdaderamente incompresible (bajo algunas condiciones incluso los líquidos son bastante compresibles), $c = \infty$ de modo que $M=0$.

Fr , Eu , We no interviene si no hay superficie libre, excepto si hay posibilidad de cavitación del líquido a valores muy bajos de Eu . Por tanto, en flujos viscosos a bajas velocidades sin superficie libre, el único parámetro adimensional importante es el número de Re .

3.1. UTILIZACIÓN PRÁCTICA DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES

Si se conocen las variables que intervienen en un fenómeno fluido, mediante el análisis dimensional, se obtiene un conjunto de grupos adimensionales independientes que, de ordinario, pueden ponerse en función de los diversos "números" discutidos previamente y de grupos adimensionales que presentan la forma de simples relaciones geométricas. Si al menos, todos menos uno se mantienen iguales en flujos geoméricamente semejantes, los flujos serán, con probabilidad, dinámicamente semejantes. Este hecho introduce la posibilidad de ensayo sobre un modelo de cierto aparato en proyecto, con el fin de estudiar, de forma menos costosa, el comportamiento y posibles variaciones de diseño. Por ejemplo en la industria de aviación, el ensayo sobre modelo de algún tipo de perfil de ala de avión o de avión entero propuesto, constituye en un programa de desarrollo una parte muy importante y significativa.

Hay que señalar que el ensayo sobre modelo no es barato, siendo el precio de los modelos de varios millones de dólares por hora. En adición a estos inconvenientes, constituye una importante cuestión práctica la consecución de la semejanza dinámica en un ensayo. Por supuesto, esto proporciona un criterio muy importante sobre la utilidad de los resultados.

3.2. TEOREMA Π DE BUCKINGHAM

El análisis dimensional permite que se reúnan las magnitudes de las cantidades apropiadas a un problema físico, en grupos adimensionales, de cada uno de los cuales se hace referencia como de una Π (la letra griega "pi" mayúscula que se usa como símbolo para un producto). La relación que conecta las magnitudes de las cantidades individuales llega entonces a ser una expresión algebraica que relaciona las Π s. Una relación como ésta se puede presentar siempre en la forma $\Phi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots) = 0$ en donde Φ significa "cierta función de". Si estas Π son independientes (en el sentido de que, por ejemplo, una Π no sea simplemente el cuadrado el recíproco de otra Π) entonces el número de Π s es igual al número de variables¹⁰ individuales menos el número total de magnitudes fundamentales distintas (tales como las de masa, longitud e intervalo de tiempo) necesarias para expresar las fórmulas dimensionales de todas las variables. De este modo, en general, el análisis dimensional resulta en una reducción del número de parámetros que en la investigación experimental de un problema, requieren una consideración separada.

En el método de Buckingham, la determinación del número de Π s implica seleccionar, a partir de las variables originales, un "juego recurrente", igual en número al número de magnitudes fundamentales, y estas variables recurrentes involucran, entre sus fórmulas dimensionales, todas las magnitudes fundamentales.

Cada una de las variables restantes se pone a su vez en turno con las del juego recurrente de modo que forme una Π . Es posible más de una selección de variables a partir del juego recurrente, y un juego diferente producirá una diferente colección de Π s. No obstante, las Π s derivadas de un modo no son independientes de las Π s derivadas de un modo diferente a partir de las mismas variables originales;

¹⁰ En este caso, la palabra "variable" sólo significa la magnitud de una cantidad física pertinente; no se implica que la magnitud varíe; ésta podría ser una "constante universal" tal como la velocidad de la luz.

de hecho, un juego de Π s se puede transformar con facilidad en otro juego (por ejemplo, por multiplicación o división de una Π por otra). Sin importar lo anterior, el número de Π s independientes debe siempre ser igual al número de variables originales, menos el número total de magnitudes fundamentales distintas; el multiplicar o dividir una Π por otra no reduce el número de Π s independientes necesario en la relación final que conecta las variables.

CAPITULO



MODELOS Y SEMEJANZAS

1. MODELO

La solución de problemas de ingeniería relacionados con la Mecánica de Fluidos implica la aplicación de datos obtenidos por métodos experimentales. En dichos problemas la forma geométrica de la estructura que guía al fluido o las condiciones propias del fluido son tan particulares que se necesitan pruebas especiales sobre una réplica a escala de la estructura para poder predecir los patrones de flujo y las variaciones de presión. La réplica a escala recibe el nombre de *modelo*, y la estructura real empleada en el proyecto se llama *prototipo*. El modelo suele hacerse a una escala mucho menor que el prototipo por razones económicas. Para analizar modelos e interrelacionar los resultados experimentales es necesario emplear parámetros adimensionales (no obstante hay que determinar los parámetros adimensionales).

Para poder interpretar correctamente los resultados del modelo es esencial poseer un conocimiento claro de la teoría fundamental del fenómeno a investigar. Las relaciones entre las características de funcionamiento del modelo y del prototipo se rigen por la teoría de la semejanza. Debido a la imposibilidad de conseguir el cumplimiento, es inevitable que surja alguna discrepancia al extrapolar hasta el tamaño natural, esto es lo que se denomina *efecto de escala*¹¹. Afortunadamente, si

¹¹ Frank M. White, Op. Cit., pág. 282.

se construye el modelo lo suficientemente grande o se hace una compensación por etapas, puede minimizarse el efecto de escala. Sin embargo, a causa de este efecto, los modelos no pueden considerarse una solución precisa en respuesta a los datos de diseño que se les introdujeran, sino que más bien instrumentos que dependen del ingenio y la habilidad humana para funcionar con éxito.

En los años recientes se ha desarrollado una tendencia favorable a construir los modelos a escalas más grandes para reducir el efecto de escala. Pero, por supuesto, no debe perderse de vista que los costos de construcción y de funcionamiento aumentan con el tamaño, por lo que los imperativos económicos exigen que se construya el modelo más pequeño posible que sea compatible con la exactitud de estudio requerida. Desde luego, la técnica de modelos no puede competir con los métodos analíticos, que son los que deberían adoptarse siempre que sea posible. Es el caso concreto de los problemas de tuberías, incluso con flujo variable, ya que normalmente pueden resolverse por métodos matemáticos o gráficos.

No se pretende crear la impresión de que la técnica de los modelos es un arte místico¹² o esotérico¹³, sólo accesible a los iniciados. Naturalmente, las investigaciones más intrincadas¹⁴ y de más alcance se desarrollará más adecuadamente en un laboratorio especializado.

La práctica actual en ingeniería recurre al empleo de modelos en un grado mucho mayor de lo que la gente se imagina. Frecuentemente se emprenden estudios sobre modelos de estructuras y máquinas hidráulicas propuestas como una ayuda en el diseño. Estos permiten una observación visual del flujo y hacen posible obtener cierta información numérica, por ejemplo, calibraciones de vertederos y compuertas, profundidades de flujo, distribuciones de velocidad, fuerza sobre compuertas, eficiencias y capacidades de bombas y turbinas, distribuciones de presión y pérdidas.

¹² Fenómeno que no se puede explicar racionalmente.

¹³ Oculto, reservado.

¹⁴ Enredadas, confusas.

Al diseñar un nuevo aeroplano, no sólo se hacen ensayos de un modelo general a escala del prototipo sino también de diversas componentes del mismo. Se efectúan numerosas pruebas de perfiles de ala, montantes de motores, plano de cola, etc.

También se ensayan en túneles de viento modelos de automóviles y trenes rápidos para predecir la resistencia al avance y los patrones de flujo de prototipo. La información obtenida indica con frecuencia los problemas potenciales que habrá que corregir antes de la construcción del prototipo, con lo cual se logran grandes ahorros económicos y de tiempo. En ingeniería civil, se efectúa pruebas para predecir las condiciones de flujo en vertederos y presas. También se hacen modelos a escala de ríos como ayuda en el proyecto de estructuras para control de inundaciones y en el análisis del movimiento de sedimentos en ríos. Los ingenieros marítimos emplean profusamente¹⁵ los ensayos de modelos de cascos de barcos para determinar sus resistencias al avance.

También se ensayan con regularidad los modelos de edificios grandes para producir las cargas de viento y las características de estabilidad, así como los patrones de flujo en las proximidades del edificio. Si se desea obtener información cuantitativa acertada de un estudio con un modelo, debe existir similitud dinámica entre el modelo y el prototipo.

2. TEORÍA DE LOS MODELOS (leyes de la semejanza¹⁶)

- 1) El modelo ha de ser **geoméricamente semejante** al prototipo, es evidente que si no se cumple esta condición la comparación de resultados entre el modelo y el prototipo es imposible.

¹⁵ Abundantemente.

¹⁶ Relaciones necesarias de correspondencia entre los comportamientos de dos objetos dimensionales distintos.

- 2) El modelo ha de ser ***dinámicamente (cinemáticamente) semejante*** al prototipo, es necesario que las velocidades, aceleraciones, fuerzas, etc., se hallen también en relaciones bien determinadas (Eu, Fr, Re, M, We).

Para que sea útil, una prueba de modelos debe producir datos para obtener las fuerzas, momentos y cargas dinámicas que existirían en el prototipo a escala natural.

3. SEMEJANZA

Siempre que sea necesario efectuar pruebas en un modelo para obtener información que no se puede conseguir por métodos analíticos puros, se debe aplicar las leyes de la *semejanza o analogías*¹⁷.

En consecuencia, la ***semejanza*** es la teoría¹⁸ y arte¹⁹ de predecir las características de un prototipo partiendo de las observaciones en un modelo.

El arte de la similitud entra al problema cuando la ingeniería tiene que tomar decisiones sobre el proyecto y construcción del modelo, el desarrollo de las pruebas o el análisis de los resultados que no aparecen en la teoría básica.

¹⁷ Relación de semejanza entre dos cosas distintas.

¹⁸ Conjunto de teoremas y de leyes organizadas sistemáticamente, sometidas a la verificación experimental, y que están encaminadas a establecer la veracidad de un sistema científico.

¹⁹ Arte, actividad que requiere un aprendizaje y puede limitarse a una simple habilidad técnica o ampliarse hasta el punto de englobar la expresión de una visión particular del mundo. El término arte deriva del latín ars, que significa habilidad y hace referencia a la realización de acciones que requieren una especialización

Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2003. © 1993-2002 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

4. SIMILITUD FÍSICA

Se dice que dos sistemas son *físicamente similares* con respecto a ciertas cantidades físicas especificadas, cuando la relación de magnitudes correspondientes de esas cantidades entre los dos sistemas, es la misma en todas partes.

La similitud física, como el análisis dimensional con el cual está cercanamente relacionada, es de gran importancia. Por sí mismo, el análisis teórico rara vez resuelve estos problemas y, por lo tanto, con frecuencia se hace necesario recurrir a los resultados experimentales para completar el estudio. Cuando se haya establecido una teoría cuantitativa completa, son necesarios los experimentos para verificar ésta, porque las teorías se basan invariablemente en ciertas suposiciones que pueden no ser satisfechas con precisión por los fluidos reales.

En cierto número de casos, las pruebas se llevan a cabo con un fluido (quizá agua) y los resultados reapan a situaciones en las cuales se usa otro fluido (por ejemplo, aire, vapor, aceite). Los resultados obtenidos bajo un conjunto de condiciones, se aplican a otro juego de condiciones. Este procedimiento se hace posible y justificable por las leyes de la similitud. Gracias a estas leyes, el comportamiento de un fluido en un juego de circunstancias se puede relacionar con el comportamiento del mismo fluido, o de otro, en otros juegos de circunstancias. Por lo general se hacen comparaciones entre el prototipo, esto es el aeroplano, barco, río, turbina u otro dispositivo reales, y el aparato modelo. Como se ha indicado ya, no es necesario que se use el mismo fluido en el prototipo y en el modelo. Tampoco es necesario que el modelo sea más pequeño que el prototipo. Por ejemplo, el flujo de fluido a través de una tobera de inyección o de un carburador, se podría estudiar con más facilidad usando un modelo mucho más grande que el prototipo. Se podría hacer lo mismo para estudiar el flujo de gas entre alabes de turbina pequeños. Sin duda el modelo y el prototipo podrían ser de dimensiones idénticas, pero habrían

diferencias en cuanto a los otros factores tales como la velocidad y la viscosidad del fluido.

Para que sea válida cualquier comparación entre el prototipo y el modelo, los juegos de condiciones asociados con cada uno de ellos deben ser físicamente similares. La similitud física es un término general que cubre un número de diferentes clases de similitud.

4.1. SIMILITUD GEOMÉTRICA

Esta requiere que el modelo y el prototipo sean de la misma forma, la propiedad característica de los sistemas **geoméricamente similares**, ya sean figuras planas, cuerpos sólidos o modelos de flujo de fluido, es que la relación de cualquier longitud en un sistema con respecto a la longitud correspondiente en el otro sistema, es en todas partes igual por medio de un factor de escala constante (se conoce por lo general como el *factor de escala*).

La similitud geométrica es quizá el requisito más obvio en un sistema modelo proyectado para corresponder a un sistema prototipo dado. Sin embargo, la similitud geométrica perfecta no siempre es fácil de obtener. No sólo debería ser la forma general del modelo geoméricamente similar a la del prototipo, sino que también deberían ser geoméricamente similares las inevitables rugosidades de la superficie. En un modelo pequeño la rugosidad superficial podría no ser reducida de acuerdo con el factor de escala (a menos que las superficies del modelo se pudieran hacer mucho más pulidas que las del prototipo). Y, por ejemplo, en el estudio del movimiento del sedimento en los ríos, un modelo pequeño requeriría (de acuerdo con el factor de escala) el uso para representar la arena, de un polvo de finura imposible de obtener.

Si por cualquier razón el factor de escala no es igual en todas partes, resulta un modelo distorsionado. Por ejemplo, un prototipo geoméricamente similar, pero tener acabados superficiales que no lo son. En el caso de prototipos muy grandes, tales como ríos, el tamaño del modelo se limitará con probabilidad por el espacio de piso de que se dispone; pero si el factor de escala utilizado para reducir las longitudes horizontales se usa también para reducir las longitudes verticales, el resultado puede ser una corriente de tan poca profundidad que la tensión superficial produzca un efecto considerable y, además, el flujo puede ser laminar en lugar de turbulento. En este caso, puede ser inevitable un modelo distorsionado.

Naturalmente, el grado hasta el cual debe buscarse la similitud geométrica perfecta depende del problema bajo investigación, y de la precisión requerida en la solución.

4.2. SIMILITUD CINEMÁTICA

Similitud de movimiento. En ésta, deberán los regímenes de flujo ser los mismos en el modelo y en el prototipo. Si los efectos de compresibilidad o cavitación, que pueden cambiar incluso los patrones cualitativos del flujo, no están presentes en el flujo del prototipo, deben evitarse en el flujo del modelo.

Esto implica similitud de longitudes (esto es, similitud geométrica) y en adición, similitud de intervalos de tiempo. Entonces, ya que las longitudes en los dos sistemas, los intervalos de tiempo y las velocidades de las partículas deben estar en una relación fija de magnitud a tiempos correspondientes. Además, las aceleraciones de las partículas correspondientes deben ser similares. Si la relación de longitudes correspondientes es r_l , y la relación de los intervalos de tiempo correspondientes es

r_t , entonces las magnitudes de las velocidades correspondientes están en la relación r/r_t , y las magnitudes de las aceleraciones correspondientes en la relación r/r_t^2 .

Un ejemplo bien conocido de similitud cinemática se encuentra en un planetario. En éste, se representa la bóveda celeste de acuerdo con una cierta escala de longitud y, al copiar los movimientos de los planetas, se usa una relación fija de intervalos de tiempo (y, por lo tanto, de velocidades y aceleraciones).

Cuando los movimientos de los fluidos son *cinemáticamente similares*, los patrones formados por las líneas de corriente son *geoméricamente similares* (en los tiempos correspondientes). Ya que los límites consisten de líneas de corriente, los flujos cinemáticamente similares sólo son posibles a través de límites geoméricamente similares. No obstante, esta condición no es suficiente para asegurar la similitud geométrica, a cierta distancia a partir de los límites, de los patrones de líneas de corriente. Por lo tanto, los límites geoméricamente similares no es necesario que impliquen flujos similares de manera cinemática.

Es necesario establecer las condiciones de prueba de manera que todas las fuerzas importantes se relacionen mediante el mismo factor de escala entre los flujos del modelo y del prototipo. La relación de presiones dinámicas en puntos correspondientes debe de ser una constante.

4.3. SIMILITUD DINÁMICA

Similitud de fuerzas. Si dos sistemas son *dinamicamente similares*, entonces las magnitudes de las fuerzas en los puntos similarmente localizados en cada sistema se encuentran en una relación fija. En consecuencia, la relación de magnitud de cualesquiera dos fuerzas en un sistema debe ser la misma que la relación de

magnitud las fuerzas correspondiente en el otro sistema. En un sistema en el que se consideren fluidos, las fuerzas se pueden deber a muchas causas: viscosidad, atracción gravitacional, diferencias de presión, tensión superficial, elasticidad y otras. Por lo tanto, deben cumplirse muchos requisitos para que exista una similitud dinámica perfecta y, en general, no es posible satisfacer todos éstos simultáneamente.

Por fortuna, en muchos casos, no se aplican algunas de las fuerzas o éstas tienen un efecto despreciable y es posible, gracias a esto, concentrarse en la similitud de las fuerzas más importantes.

La justificación para comparar los resultados obtenidos en un sistema de flujo con los de otro sistema, es que el comportamiento del fluido es similar en los dos sistemas, esto es, los flujos son cinemáticamente similares. ¿Cuáles son entonces las condiciones en las cuales se obtienen flujos cinemáticamente similares? Una condición necesaria es que los límites sean geoméricamente similares. Pero además, se requiere la similitud de fuerzas, puesto que la dirección que toma cualquier partícula se determina por la fuerza resultante que actúa sobre ella. En consecuencia, sólo se puede lograr la similitud completa entre dos flujos cuando sobre las partículas correspondientes en éstos actúan fuerzas resultantes que tienen la misma dirección y reencuentran en una relación de magnitudes fija. Además, se aplican las mismas condiciones a las componentes de estas fuerzas resultantes. Las direcciones de las fuerzas componentes se determinan ya sea por circunstancias externas (como por las fuerzas de gravedad, por ejemplo) o por el propio patrón de flujo (como para las fuerzas viscosas). Por lo tanto, en los flujos dinámicamente similares, los polígonos de fuerzas para las partículas individuales correspondientes son geoméricamente similares, y por esto también las fuerzas componentes tienen la misma relación de magnitud entre los dos flujos. La similitud dinámica, entonces, produce la similitud geométrica de los patrones de flujo.²⁰

²⁰ La existencia de la similitud geométrica no implica necesariamente la similitud dinámica.

Algunas investigaciones pueden demandar la similitud térmica en la cual las diferencias de temperatura se encuentran en una relación fija entre el modelo y el prototipo. En la similitud química existe una relación fija entre las concentraciones de los reactivos en puntos correspondientes.

4.3.1. RELACIONES DE FUERZAS QUE SE PRESENTAN EN LA SIMILITUD DINÁMICA (los parámetros adimensionales)

Las fuerzas que controlan el comportamiento de los fluidos surgen de varias maneras. No todas las clases de fuerzas entran en cada problema, es útil hacer una lista de los tipos posibles.

- 1) Fuerzas debidas a diferencias de presión piezométrica entre distintos puntos en el fluido. La frase "en el fluido" merece énfasis. La similitud dinámica del flujo no necesariamente requiere similitud de empujes sobre partes correspondientes de las superficies de los límites y, por lo tanto, no es importante la magnitud de la presión piezométrica relativa a los alrededores. Por motivos de brevedad, a las fuerzas debidas a diferencias de presión piezométrica se les denomina "fuerzas de presión".
- 2) Fuerzas resultantes de la acción de la viscosidad.
- 3) Fuerzas que actúan desde el exterior del fluido (la gravedad, por ejemplo).
- 4) Fuerzas debidas a la tensión superficial.
- 5) Fuerzas elásticas, esto es, debidas a la compresibilidad del fluido.

Cualquiera de las fuerzas anteriores, al actuar en combinación sobre una partícula de fluido, tienen en general una resultante. Esta es la fuerza resultante que, de acuerdo con la Segunda Ley de Newton, $F = m a$, causa una aceleración de la

partícula en la misma dirección de la fuerza. Y las aceleraciones de las partículas individuales, en conjunto determinan el patrón de flujo.

Si se aplicara a la partícula además de la fuerza F , una fuerza extra ($-m a$) en la misma dirección de F , la fuerza neta sobre la partícula valdría $F - m a$, es decir, cero. Es obvio que con una fuerza neta cero actuando sobre la misma, la partícula no tendría aceleración. Esta fuerza hipotética ($-m a$), que se requiere para llevar a cero la aceleración de la partícula, se denomina la *fuerza de inercia* y representa la reluctancia de la partícula a ser acelerada. No obstante, la fuerza de inercia no es de ninguna manera independiente de las otras fuerzas ejercidas sobre la partícula, sino que es, como se ha visto, igual y opuesta a la resultante F de aquéllas.

6) Fuerzas de inercia.²¹

Si las fuerzas ejercidas sobre cualquier partícula se representan por los lados de un polígono de fuerzas entonces la fuerza de inercia corresponde al lado requerido para cerrar el polígono. Un polígono se puede especificar por completo se conocen la magnitud y dirección de todos sus lados excepto uno. El lado restante, no especificado, se fija automáticamente por la condición que debe cerrar el polígono. En consecuencia, si para cualquier partícula singular se indica esta fuerza de inercia hipotética, cualquiera de las otras fuerzas puede permanecer sin especificar; ésta sufiija por la condición de que el polígono de fuerzas debe ser completamente cerrado; en otras palabras, que la adición de la fuerza de inercia debe producir una fuerza resultante cero.

Para que exista similitud dinámica entre dos sistemas, las fuerzas ejercidas sobre cualquier partícula en uno de los sistemas deben tener las mismas relaciones de magnitud entre si que las fuerzas sobre la correspondiente partícula en el otro sistema. En la mayor parte de los casos se pueden seleccionar para consideración

²¹ Es útil añadir a la lista, como un concepto separado, es de las fuerzas de inercia, ya que se está estudiando el patrón de flujo.

varias relaciones de pares de fuerzas. Pero como las aceleraciones de las partículas (y, por tanto, las fuerzas de inercia) desempeñan un papel importante en prácticamente cada problema de movimiento de fluido, se ha hecho práctica seleccionar para consideración las relaciones entre la magnitud de la fuerza de inercia y la de cada una de las otras fuerzas en turno.

Similitud dinámica de flujo con fuerzas viscosas actuando: Existen muchos casos de flujo afectado tan sólo por las fuerzas viscosas, depresión y de inercia. El fluido se encuentra en un conducto lleno, completamente cerrado, la gravedad no puede afectar al patrón de flujo; la tensión superficial no tiene efecto, puesto que no existe una superficie libre; y si la velocidad se encuentra bastante debajo de la velocidad del sonido en ese fluido, la compresibilidad no es de consecuencia. Estas condiciones se cumplen también en el caso del flujo del aire alrededor de una aeronave de baja velocidad y en el flujo del agua alrededor de un submarino lo bastante sumergido como para no producir olas en la superficie.

Ahora, para que exista similitud dinámica entre dos sistemas, la relación entre las magnitudes de dos fuerzas cualesquiera debe ser la misma en puntos correspondientes de los dos sistemas (y, si el flujo no es permanente, también en tiempos correspondiente). Existen tres posibles pares de fuerzas de diferentes clases, pero, por convención, se selecciona la relación de fuerza de inercia a fuerza viscosa para que sea la misma en cada caso.

La fuerza de inercia que actúa sobre una partícula de fluido es igual en magnitud al producto de la masa de la partícula multiplicado por su aceleración. La masa es igual al producto de la densidad ρ por el volumen (y el volumen se puede tomar como proporcional al cubo de alguna longitud l que sea característica de la geometría del sistema). Por lo anterior, la masa es proporcional a ρl^3 . La aceleración de la partícula es el régimen al cual cambia con el tiempo su velocidad en esa

dirección y, por tanto, es proporcional en magnitud a cierta velocidad particular dividida por cierto intervalo particular de tiempo, esto es, por ejemplo, a u/t . Sin embargo, el intervalo de tiempo se puede tomar como proporcional a la longitud característica l seleccionada, dividida por la velocidad característica, de manera que al final, se puede establecer la aceleración como proporcional a $u / (l/u) = u^2 / l$. Por lo tanto, la magnitud de la fuerza de inercia es proporcional a $(\rho l^3 u^2 / l) = \rho l^2 u^2$.

El esfuerzo de corte resultante de la viscosidad se da por $\mu \delta u / \delta y$ que es proporcional a $\mu u / l$. La magnitud del área sobre la cual actúa el esfuerzo es proporcional a l^2 y así, la magnitud de la fuerza viscosa es proporcional a $(\mu u / l) \times l^2 = \mu u l$.

En consecuencia, la relación:

$$\frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza viscosa}} \text{ es proporcional a } \frac{\rho l^3 u^2}{\mu l} = \frac{\rho l u}{\mu}$$

La relación $\rho l u / \mu$ es el ya mencionado **número de Reynolds**. Para que exista similitud dinámica entre dos flujos que pasan sobre límites geoméricamente similares y afectados solo por las fuerzas viscosas de presión y de inercia, la relación de magnitudes de las fuerzas de inercia y viscosas en puntos correspondientes, debe ser la misma. Ya que esta relación es proporcional al número de Reynolds, se satisface la condición para la similitud dinámica cuando los números de Reynolds basados en las correspondientes longitudes y velocidades características, son idénticos para los dos flujos.

La longitud l en la expresión del número de Reynolds puede ser cualquier longitud que sea significativa para determinar el patrón de flujo. Para un tubo de sección circular completamente lleno de fluido, se usa en la actualidad e invariablemente el diámetro por lo menos en Inglaterra y en América del Norte. (Excepto cerca de la entrada y la salida del tubo, la longitud a lo largo de su eje no es

pertinente para determinar el patrón de flujo. Siempre que el área de sección transversal del tubo sea constante, y despreciables los efectos de la compresibilidad, el patrón de flujo no cambia a lo largo de la dirección del flujo.) Por convección también, la velocidad promedio a través de la sección transversal del tubo se selecciona como la velocidad característica u .

Para el flujo alrededor de una placa plana, la longitud que se toma como característica de patrón de flujo es la medida a lo largo e ésta a partir de su borde de ataque, y la velocidad característica es la de bastante corriente arriba de la placa. El punto esencial es que, en todas las comparaciones entre dos sistemas, deben usarse longitudes y velocidades similarmente definidas.

Similitud dinámica de flujo con fuerzas de gravedad actuando: Se considerará ahora el flujo en el cual las fuerzas significativas son las fuerzas de gravedad, las fuerzas de presión y las fuerzas de inercia. Se encuentra un movimiento de este tipo cuando existe presente una superficie libre, o cuando hay una interfaz entre dos fluidos inmiscibles. Un ejemplo es el del flujo de un líquido en un canal abierto; otro es el del movimiento ondulatorio causado por el paso de un barco a través del agua. Otros casos son los del flujo sobre vertedores y el flujo de chorros desde orificios hacia la atmósfera.

La condición para que exista la similitud dinámica entre flujos de este tipo es que la relación de magnitudes de las fuerzas de inercia a las de gravedad, debe ser la misma en puntos correspondientes de los dos sistemas que se compara. Las fuerzas de presión se toman en cuenta, como en el caso anterior en el que actuaban fuerzas viscosas, por el requisito de que la fuerza resultante debe ser cero. La magnitud de la fuerza de inercia sobre una partícula de fluido es proporcional a $\rho l^2 u^2$ en la que ρ representa la densidad del fluido, l una longitud característica y u una velocidad característica. La fuerza de gravedad sobre la partícula es su peso, en la que g representa el peso por unidad de masa. En consecuencia, la relación:

$$\frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza de gravedad}} \text{ es proporcional a } \frac{\rho l^2 u^2}{\rho l^3 g} = \frac{u^2}{lg}$$

En la práctica es con frecuencia más conveniente usar la raíz cuadrada de esta relación para trabajar con la primera potencia de la velocidad. Esto es muy permisible, ya que la igualdad de $u/(lg)^{1/2}$, implica la igualdad de u^2/lg . La relación $u/(lg)^{1/2}$ es conocida como el **número de Froude**.²²

Por lo anterior, la similitud dinámica entre flujos de este tipo se obtiene cuando los valores del número de Froude (basados en velocidades y en longitudes correspondientes) son los mismos en cada caso.

Por supuesto, los límites de los flujos deben ser geoméricamente similares y también deberá aplicarse el factor de escala geométrica a los puntos correspondientes debajo de la superficie libre.

En cualquier flujo que tenga una superficie libre, son importantes las fuerzas de gravedad. Ya que, bajo condiciones permanentes, la presión en la superficie es constante (por lo general atmosférica), sólo las fuerzas de gravedad pueden causar flujo. Además, cualquier perturbación de la superficie libre, como el movimiento de ondas, implica fuerzas de gravedad, puesto que debe realizarse un trabajo para elevar el líquido contra el efecto de su peso.

El número de Froude constituye así un parámetro significativo para determinar qué parte de la resistencia de un barco es debida a la formación de ondas superficiales.

Similitud dinámica de flujo con fuerzas de tensión superficial actuando:

En la mayor parte de los ejemplos de flujo que ocurren en los trabajos de ingeniería,

²² Algunos autores han denominado número de Froude al cuadrado de este número, pero en la actualidad se usa más la definición: número de Froude = $u/(lg)^{1/2}$.

las fuerzas de tensión superficial son despreciables en comparación con otras fuerzas presentes y el ingeniero no trata con frecuencia la similitud dinámica con respecto a la tensión superficial.

No obstante, en ciertos problemas son importantes las fuerzas de tensión superficial, por ejemplo, en aquellos en los que aparecen ondas capilares, en el comportamiento de chorros pequeños formados bajo la acción de cargas pequeñas, y en flujos de una lámina delgada de líquido sobre una superficie sólida.

En este caso, la relación significativa de fuerzas es la de fuerza de inercia a Fuerza de tensión superficial. (Otra vez, aun cuando se hallen presentes las fuerzas de presión, no es necesario considerarlas por separado.) La fuerza debida a la tensión superficial es tangencial a la superficie, y tiene la misma magnitud perpendicularmente a cualquier elemento de línea de longitud unitaria a lo largo de la superficie. Si el elemento de línea es de longitud Δl , entonces la fuerza de tensión superficial es $\gamma(\Delta l)$ en donde γ de representa la tensión superficial. Ya que la fuerza de inercia es proporcional a $\rho l^2 u^2$ y Δl es proporcional a la longitud característica l , la relación:

$$\frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza de tensión superficial}} \text{ es proporcional a } \frac{\rho l^2 u^2}{\gamma l} = \frac{\rho l u^2}{\gamma}$$

La raíz cuadrada de esta relación, $u(\rho l/\gamma)^{1/2}$, es el **número de Weber**.²³

Similitud dinámica de flujo con fuerzas elásticas actuando: Cuando la compresibilidad del fluido es importante, deben considerarse las fuerzas elástica, junto con las fuerzas de inercia y de presión, y la relación de magnitud de fuerzas considerada para la similitud dinámica es la de fuerza de inercia a fuerza elástica. Para un grado dado de compresión, el aumento de presión es proporcional al módulo de elasticidad volumétrico, k . Por tanto, si otra vez se representa por l una longitud

²³ Sin embargo, algunas veces se da este nombre a la relación $\rho l u^2/\gamma$ y aun al recíproco de este número.

característica del sistema, el aumento de presión actúa sobre un área de magnitud proporcional a l^2 , y la magnitud de la fuerza es proporcional a kl^2 . En consecuencia la relación:

$$\frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza elástica}} \text{ es proporcional a } \frac{\rho l^2 u^2}{kl^2} = \frac{\rho u^2}{k}$$

El parámetro $\rho u^2/k$ se conoce como el **número de Cauchy**, en honor del matemático francés A. L. Cauchy (1789-1875). Sin embargo, la velocidad con la que se propaga una onda sonora a través del fluido (ya sea éste un líquido o un gas) es $a = (k_s/\rho)^{1/2}$ en donde k_s representale módulo volumétrico *isentrópico*. Si se supone por el momento que el flujo bajo consideración es isentrópico, la expresión $\rho u^2/k$ se vuelve u^2/a^2 .

En otras palabras, se obtiene la similitud dinámica entre dos flujos isentrópicos si, al mismo tiempo que el prerequisite de similitud geométrica de los límites, la relación u^2/a^2 es la misma para puntos correspondientes en esos dos flujos.

Esta condición es equivalente a la más sencilla de que u/a debe ser la misma en puntos correspondientes. Esta última relación se conoce como el **número de Mach**. Este número es de gran importancia en el estudio del flujo de los fluidos compresibles. Deberá recordarse que a representa la velocidad local del sonido, la que para un fluido dado se determina por los valores de la presión absoluta y la densidad en el punto en el que se mide u .

El módulo volumétrico que aparece en la expresión $(k_s/\rho)^{1/2}$ es el módulo volumétrico isentrópico, es decir, éste se refiere a cambios de densidad durante los cuales no se transfiere calor entre el fluido y sus alrededores, y los efectos de fricción son despreciables. No obstante, los cambios de densidad no ocurren isentrópicamente (lo que bien puede suceder si el cambio de densidad no es pequeño en comparación con la densidad promedio) entonces surgen

consideraciones termodinámicas. En particular, la relación γ entre las capacidades térmicas específicas principales debe entonces ser la misma en los dos casos considerados. Por lo general este punto se tiene en cuenta porque, en los casos en los que es importante la compresibilidad del fluido, los experimentos sobre el modelo se llevan a cabo en forma casi invariable con el mismo fluido usado en el prototipo.

Cuando ocurren cambios apreciables de temperatura, también pueden ser importantes los modos en los cuales varían con la temperatura la viscosidad y la conductividad térmica.

Los efectos de la compresibilidad se hacen por lo general importantes en la práctica cuando el número de Mach excede de cerca de 0.4. Aparte de su bien conocido significado en relación con las aeronaves y proyectiles de alta velocidad, el número de Mach también entra en el estudio de los propulsores y de los componentes rotativos.

24

Definición de la relación	Nombre de la relación	Representa la relación de magnitudes de estas fuerzas	Símbolo recomendado
$u\rho/\mu$	Número de Reynolds	<u>Fuerza de inercia</u> Fuerza viscosa	<i>Re</i>
$w/(lg)^{1/2}$	Número de Froude	<u>Fuerza de inercia</u> Fuerza de gravedad	<i>Fr</i>
$u(\rho/\gamma)^{1/2}$	Número de Weber	<u>Fuerza de inercia</u> Fuerza de tensión superficial	<i>We</i>
$\frac{u}{(k/\rho)^{1/2}} = \frac{u}{a}$ $= \frac{u}{\text{Vel. local del sonido}}$	Número de Mach (condiciones isentrópicas)	<u>Fuerza de inercia</u> Fuerza elástica	<i>M</i>

²⁴ Bernard S. Massey, *Mecánica de Fluidos*, pág. 340.

En todos los casos l representa una longitud que es característica del patrón de flujo. Excepto en algunos pocos casos en los que se determina por convención, siempre deberá especificarse. También u representa una velocidad que es característica del patrón de flujo y que por lo general, deberá especificarse.

Otros tipos de similitud dinámica: Las fuerzas de presión siempre se encuentran presentes y, por lo tanto, representadas en cualquier ecuación completa que describa el flujo. Cuando la ecuación se encuentra en forma adimensional, aparece la relación entre estas fuerzas y las de otros tipos. Por ejemplo, la relación:

$$\frac{\text{Fuerza de presión}}{\text{Fuerza de inercia}} \text{ es proporcional a } \frac{\Delta p * l^2}{\rho l^2 u^2} = \frac{\Delta p *}{\rho u^2}$$

En la que Δp representa la diferencia de presión piezométrica entre dos puntos en el flujo. Esta relación (que algunas veces se conoce como el número de Newton) se suplanta con frecuencia por $\Delta p / (\frac{1}{2} \rho v^2)$ en la cual se inserta el $\frac{1}{2}$ para que el denominador represente la energía cinética por unidad de volumen o, para un fluido incompresible, la presión dinámica de la corriente. Esta forma modificada se identifica algunas veces como el *coeficiente de presión*.

En algunos casos de flujo líquidos, la presión puede llegar a ser tan baja en ciertos puntos, que se formen en éstos cavidades de vapor (éste es el fenómeno de la cavitación). Las presiones se expresan entonces útilmente con relación a p_v , la presión de vapor del líquido a la temperatura en cuestión. Un parámetro adimensional significativo es el **número de cavitación** $(p - p_v) / \frac{1}{2} \rho u^2$ (que se puede considerar como un caso especial del coeficiente de presión).²⁵

Pueden aparecer relaciones que impliquen fuerzas eléctricas magnéticas si el fluido es permeable a los campos eléctricos y magnéticos.

²⁵ Para máquinas que operan por, o sobre fluidos, se usa con mayor frecuencia una definición especial.

4.3.2. APLICACIÓN DE LA SIMILITUD DINÁMICA

Para la resolución de muchos problemas de la mecánica de fluidos, se requiere trabajo experimental y que este trabajo se hace con frecuencia con modelos del prototipo. Para tomar un ejemplo bien conocido, el desarrollo de una aeronave se basa en experimentos hechos con modelos pequeños de la misma, sostenidos en un túnel de viento. Las pruebas y las modificaciones subsecuentes no sólo serían costosas en una aeronave real, sino que podría existir considerable riesgo para la vida humana. No obstante, las pruebas sobre el modelo tendrán poca influencia sobre el prototipo a menos que se lleven a cabo bajo condiciones en las cuales el flujo del aire alrededor del modelo sean dinámicamente similares a las del flujo alrededor del prototipo.

Cualesquiera cantidades medidas en el curso de la prueba del modelo, dependerán de los valores de las variables independientes implicadas. La aplicación del análisis dimensional al problema, dará un resultado de la forma:

$$\Pi_1 = \phi(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \dots)$$

En el cual las Π s son grupos adimensionales. Para descubrir el valor de Π_1 que corresponde a los valores particulares de Π_2, Π_3, Π_4 , etc., tiene el mismo valor para el prototipo que para el modelo, entonces el resultado es aplicable por igual al prototipo.

Si se logran esas condiciones, se dice que el modelo y el prototipo son *completamente similares*. La similitud completa incluye la similitud geométrica, ya que algunas de las Π s representarán relaciones de longitudes significativas. Pocas veces es factible obtener la similitud completa entre el modelo y el prototipo. Esto se debe a que las condiciones requeridas para hacer, por ejemplo, a Π_2 la misma en cada caso, entran en conflicto con las condiciones para que las Π_3 sean las mismas.

Por fortuna, en muchos problemas no todas las relaciones de magnitudes de fuerza son pertinentes, y se pueden conocer algunas que tengan efectos despreciables.

Considérese la prueba de un modelo de aeronave en un túnel de viento, con objeto de obtener la fuerza de resistencia al avance F sobre el prototipo. Por supuesto, el modelo y el prototipo son geoméricamente similares. Las fuerzas viscosas y de inercia deberán considerarse, sin embargo, se pueden despreciar las fuerzas de gravedad. Esto se debe a que el fluido implicado —aire— es de poca densidad, y el movimiento vertical de las particular de aire al fluir alrededor de la aeronave es insignificante; por lo tanto, será despreciable el trabajo realizado por la gravedad. La tensión superficial no importará en este caso, ya que no existe una interfaz entre un líquido y otro fluido, y se supondrá que la aeronave es del tipo de baja velocidad, de manera que los efectos de la compresibilidad serán despreciables. Entonces, aparte de las inevitables fuerzas de presión, sólo se implican las fuerzas de inercia y viscosas y, por lo tanto, el parámetro adimensional pertinente que aparece como variable independiente, es el número de Reynolds. De hecho, el proceso usual del análisis dimensional produce el resultado:

$$\frac{F}{\rho l^2 u^2} = \left(\frac{ul\rho}{\mu} \right) = \phi(\text{Re}) \quad (1)$$

En el que ρ y μ representan respectivamente, la densidad y la viscosidad del fluido utilizado, u representa la velocidad relativa entre la aeronave (prototipo o modelo) y el fluido a cierta distancia de ésta, y l alguna longitud característica —por ejemplo, la envergadura del ala.

La ecuación (1) es cierta, tanto para el modelo como para el prototipo. No obstante, para que exista similitud dinámica verdadera entre el modelo y el prototipo, la relación de magnitudes de fuerza en puntos correspondientes debe ser la misma para ambos y, por tanto, en este caso, el número de Reynolds debe ser el mismo. En consecuencia, la función $\phi(\text{Re})$ tiene el mismo valor, tanto para el prototipo como

para el modelo, y así $F/\rho l^2 u$ es la misma en cada caso. Usando el subíndice m para el modelo y el subíndice p para el prototipo, se puede escribir:

$$\frac{F_p}{\rho_p l_p^2 u_p^2} = \frac{F_m}{\rho_m l_m^2 u_m^2} \quad (2)$$

Este resultado sólo es válido si la prueba sobre el modelo se lleva a cabo bajo tales condiciones que el número de Reynolds sea el mismo que para el prototipo. Entonces:

$$\frac{u_m l_m \rho_m}{\mu_m} = \frac{u_p l_p \rho_p}{\mu_p} \text{ y así } u_m = u_p \left(\frac{l_p}{l_m} \right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left(\frac{\mu_m}{\mu_p} \right) \quad (3)$$

La velocidad u_m para la cual esto es cierto, se conoce como la *velocidad correspondiente*. Sólo cuando se prueba el modelo a la velocidad correspondiente, tiene lugar la formación de remolinos y otros fenómenos en puntos correspondientes a los del prototipo, y sólo entonces los patrones de flujo total son exactamente similares.

Aunque la velocidad correspondiente u_m debe determinarse igualando el número de Reynolds (u otro parámetro pertinente) para el modelo y el prototipo, pueden existir otras consideraciones que limiten la gama de u_m . Cuando se prueba un modelo de aeronave, es natural que el tamaño del modelo sea más pequeño que el del prototipo. En otras palabras, l_p/l_m es mayor a 1.0. Si el modelo se prueba en el mismo fluido (aire atmosférico) que el usado para el prototipo, se tiene $\rho_m = \rho_p$ y $\mu_m = \mu_p$. Así, de la ec. 3 $u_m = u_p (l_p/l_m)$ y ya que l_p/l_m es mayor que 1, u_m es más grande que u_p . Aun para un prototipo proyectado para volar a sólo 300 km/h, por ejemplo, un modelo construido a escala de un quinto, tendría que ser probado a una velocidad del aire de $300 \times 5 = 1500$ km/h. A velocidades tan altas como ésta, los efectos de la compresibilidad del aire se hacen muy importantes y el patrón de flujo alrededor del modelo será muy diferente del patrón de flujo alrededor del prototipo, aun cuando el

número de Reynolds se conserve el mismo. Con las aeronaves actuales de alta velocidad, tales dificultades en la prueba de los modelos se acentúan, por supuesto.

Un modo de obtener un número de Reynolds suficientemente alto, sin usar en forma inconveniente altas velocidades, es la de probar el modelo en aire de densidad más allá. En el ejemplo que se acaba de considerar, si el aire se comprimiera a una densidad de cinco veces la de la atmósfera, entonces $u_m = u_p (5)(1/5)(1/1) = u_p$ ²⁶, esto es, el modelo y el prototipo se podrían probar a la misma velocidad relativa del aire.

Por supuesto, este procedimiento implica un aparato mucho más complicado que el de un túnel semejante de "densidad variable" deberá sacrificarse la similitud completa y buscarse una solución compromiso. De hecho es posible en este caso extrapolar los resultados de una prueba a velocidad moderada, a los encontrados bajo el número de Reynolds más alto del prototipo. La base de la extrapolación es que se han obtenido las relaciones entre el número de Reynolds y las fuerzas implicadas a partir de experimentos en los que se han comparado otros modelos con sus prototipos.

Para que exista similitud dinámica en casos en los que son importantes los efectos de la compresibilidad en el prototipo (como, por ejemplo, para una aeronave de alta velocidad), también debe ser idéntico el número de Mach. Por lo tanto, para la similitud completa se requiere,

$$\frac{u_m l_m \rho_m}{\mu_m} = \frac{u_p l_p \rho_p}{\mu_p} \quad (\text{igualdad del número de Reynolds})$$

y

$$\frac{u_m}{a_m} = \frac{u_p}{a_p} \quad (\text{igualdad del número de Mach})$$

²⁶ Ya que la temperatura del aire comprimido no sería muy diferente de la del aire atmosférico, la viscosidad absoluta no sería apreciablemente diferente para el modelo y para el prototipo. Tampoco cambiaría la velocidad sónica $a = (\gamma p / \rho)^{1/2} = (\gamma RT)^{1/2}$. De esta manera, se podrían evitar los efectos indeseables de la compresibilidad.

Para que ambas condiciones se satisfagan simultáneamente

$$\left(\frac{l_p}{l_m}\right)\left(\frac{\rho_p}{\rho_m}\right)\left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right) = \frac{u_m}{u_p} = \frac{a_m}{a_p} = \left(\frac{k_m/\rho_m}{k_p/\rho_p}\right)^{1/2} \quad (3)$$

Por desgracia, la gama de valores de ρ , μ y k par a los líquidos de que se dispone es limitada y, por tanto, no se puede lograr una relación dimensional (l_p/l_m) que sea valiosa. No obstante, se pueden hacer similares los fenómenos de compresibilidad usando el mismo número de Mach para el modelo y para el prototipo. Esta condición no impone restricción sobre la escala del modelo, ya que no se implica ninguna longitud característica en el número de Mach. Si se usa para el modelo y para el prototipo el mismo fluido a la misma presión y a la misma temperatura, entonces $k_m = k_p$ y $\rho_m = \rho_p$ (en puntos correspondientes) y así $a_m = a_p$ y $u_m = u_p$. Así, el modelo tiene que probarse a la misma velocidad que la del prototipo, sin importar el tamaño de aquél. En una prueba llevada a cabo bajo estas condiciones, el número de Reynolds no sería igual que para el prototipo y, en consecuencia, las fuerzas viscosas estarían fuera de escala. Por fortuna, en las circunstancias aquí consideradas, se puede considerar que las fuerzas viscosas sólo tiene un efecto secundario y puede permitirse que se desvíen de los valores que requiere la similitud completa. Se ha encontrado que, para la mayor parte de los propósitos de la práctica, la ec. (2) constituye una aproximación adecuada aun cuando u_m no sea la velocidad correspondiente que dé la igualdad del número de Reynolds.

El punto importante es éste. Si sólo son significativas las fuerzas de una clase, aparte de las fuerzas de inercia y de presión, entonces se logra la similitud dinámica completa simplemente haciendo que los valores del parámetro adimensional apropiado (números de Reynolds, Froude, Weber o Mach) sean los mismos para el modelo y el prototipo. Cuando es pertinente más de uno de tales por lo general es necesario alejarse de la misma. Es esencial que estas desviaciones sean justificadas. Por ejemplo, debe saberse que las fuerzas para las cuales no se puede

obtener la similitud dinámica, tienen sólo una influencia pequeña, o una influencia que no cambia notoriamente con una alteración en el valor del parámetro adimensional apropiado. Si es posible, deberán hacerse correcciones para compensar esos alejamientos de la similitud completa.

No deberá descuidarse una precaución adicional en relación con la prueba de modelos. Puede suceder que las fuerzas que tengan un efecto despreciable sobre el prototipo, afecten materialmente el comportamiento del modelo. Por ejemplo, la tensión superficial tiene un efecto despreciable sobre el flujo en los ríos, pero si el modelo de un río está a escala pequeña, las fuerzas de tensión superficial tendrán un notable efecto sobre el mismo. En otras palabras, el número de Weber puede tener significado para el modelo, aunque en el prototipo se puede despreciar con seguridad. El resultado de este alejamiento de la similitud completa (un efecto despreciable para el prototipo que es apreciable para el modelo -o viceversa-) conocido como el *efecto escala*. La rugosidad de la superficie de los límites sólidos con frecuencia da lugar a otro efecto de escala. Aún más seria es una discrepancia del número de Reynolds por la cual existe flujo laminar en el sistema modelo, aunque el flujo en el sistema prototipo sea turbulento. Los efectos de escala se reducen usando modelos que no difieran en tamaño del prototipo en más de lo necesario.

CAPÍTULO



TÚNEL DE VIENTO

1. DEFINICIÓN

Después de que el hombre se da cuenta que para volar necesita más que imitaciones rudimentarias del aleteo de las aves y comprende que debe aumentar su conocimiento en lo que hoy en día llamamos aerodinámica, crea aparatos e instrumentos que le permitan medir las fuerzas que experimentan los cuerpos dentro de fluidos en movimiento. Desde el siglo XVIII rondaba la idea de que estas fuerzas dependían de la velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido, por ello se diseñaron brazos mecánicos que se desplazaban sobre rieles, sosteniendo distintos prototipos; el problema de este sistema era que el modelo se movía a través de un flujo turbulento, desordenado por el movimiento del brazo. Para obviar este obstáculo, se decidió dejar el modelo quieto y hacer que circule el aire alrededor de él; y si a esta idea la colocamos dentro de un ducto, obtenemos lo que conocemos como un túnel de viento.

Aunque hay muchas familias de túneles de viento en general pueden definirse como conductos que llevan en alguna parte de su trayecto un ventilador accionado por un motor, que se encarga de que el aire fluya de manera constante; usualmente las aspas del ventilador son diseñadas, según el tipo de túnel que se vaya a construir, de manera similar a como se hacen las de los aviones. La parte de interés para la experimentación es la sección de pruebas, que debe ser transparente para permitir la observación e incluso filmación, en ella se instala el modelo y diferentes aparatos que miden las fuerzas que experimenta éste y las condiciones del aire que

atraviesa esa sección. Resulta de interés que la sección de pruebas sea de menor área que el resto del túnel, ya que por conservación de caudal genera una velocidad mayor cerca del modelo; ahorrando energía en el ventilador, que genera el mismo efecto en la sección de pruebas con una potencia menor, que además reduce las pérdidas por fricción en las paredes y codos del túnel.

Al estudiar la aerodinámica de un vehículo los fabricantes utilizan los túneles de viento, en los que se pueden ensayar vehículos a tamaño real o maquetas a escala, simulando condiciones similares a las que existirían con el vehículo en movimiento. Para ello, se genera una corriente de aire mediante unos ventiladores y turbinas gigantes y se hace fluir sobre la carrocería. Mediante técnicas adicionales como el uso de luz ultravioleta, espuma o corrientes de humo, se puede estudiar cómo se comporta un determinado diseño ante el viento. Los más modernos túneles de viento pueden simular incluso condiciones climáticas adversas, como lluvia o nieve.

2. OBJETIVO DE LOS TÚNELES

Medir las fuerzas dinámicas y sus efectos sobre modelos a escala reducida, principal objetivo.

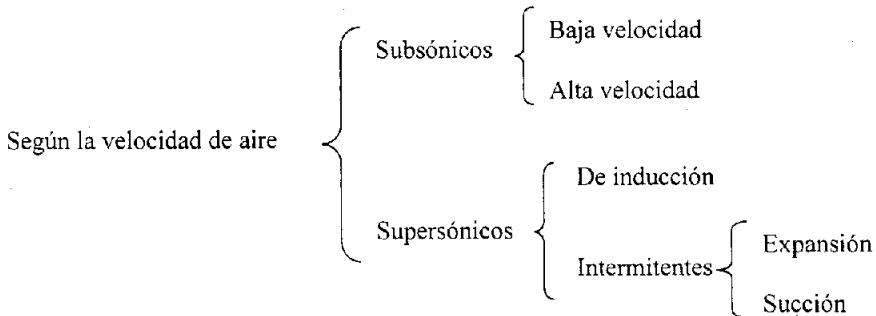
Varias especialidades en la ingeniería que se dedican a estudiar más a fondo los problemas que se presentan de su campo de acción, particularmente en Mecánica de Fluidos tienen lugar preponderante el estudio de la Hidráulica y la Aeronáutica para el análisis de problemas relacionados con el movimiento del agua o del aire y tomando en cuenta sus propiedades físicas y mecánicas poder cuantificar, por ejemplo, los empujes que produce el viento sobre las estructuras como: edificios, torres de transmisión chimeneas, etc., o para el caso en general.

CAPITULO IV

TIPOS DE TÚNELES

Hay varios métodos para la clasificación de túneles de los cuales ninguno parece estandarizado.

1. SEGÚN LA VELOCIDAD DEL AIRE²⁷



La gran variedad de problemas que se ataca actualmente por medio de túneles de viento hace que el rango de velocidad varíe desde unos cuantos metros por segundo hasta velocidades superiores a la del sonido.

²⁷ Dario F. de Hoyos P., Diseño de un túnel de viento de 50 HP, pág. 12.

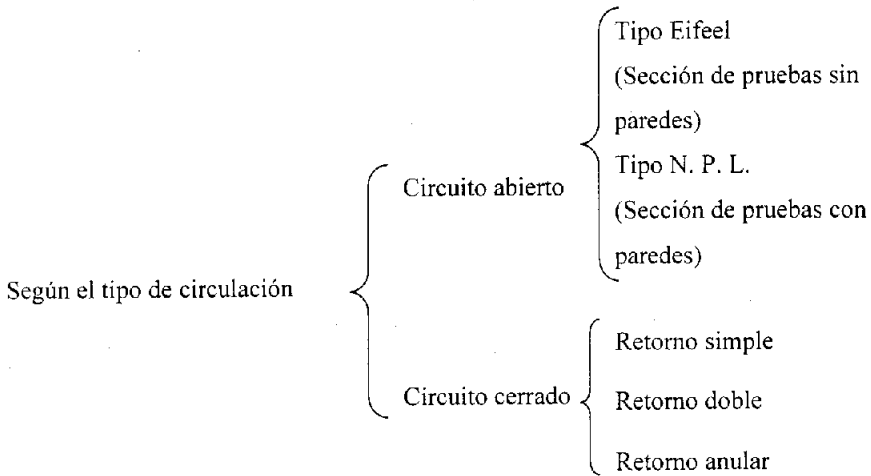
Subsónicos: Dentro de este rango, el problema de aumentar la velocidad en la sección de prueba obliga a fabricar túneles de mayor potencia o túneles capaz de soportar grandes presiones.

La atracción de los túneles de viento radica en que no es necesario someter a experimentación el prototipo sino a un modelo que guarde semejanza aerodinámica. Para conocer las fuerzas que se aplican al caso real, en un túnel subsónico, esta semejanza requiere que el número de Reynolds sea igual para el prototipo y el modelo, además debe existir una similitud geométrica, lo que hace que ambos tengan la misma escala de longitudes, tiempos y fuerzas. El tamaño del modelo define en muchos casos el tamaño de la sección; en teoría sería ideal que la sección tuviera el mayor ancho posible, sin embargo, por razones económicas, es aceptable que la envergadura del modelo sea como máximo cuatro quintas partes del ancho de la sección, de manera que el efecto de las paredes no se vea reflejado en las mediciones.

Supersónicos: Estos túneles presentan grandes dificultades tanto de funcionamiento como de potencia requerida. Las secciones de prueba deben tener una forma especial para producir el salto a la barrera supersónica, y nuevamente el retorno a velocidad subsónica, pues ello produce grandes pérdidas de energía.

Las velocidades supersónicas se logran en la práctica por medio de chiflones después de la sección de prueba (inducción) que provocan un vacío que hace pasar el aire por la sección de pruebas a gran velocidad, otra manera de hacerlo es provocar la corriente de aire mediante grades esferas al vacío que se abren repentinamente (succión) ó esferas a grandes presiones colocadas antes de la sección de prueba (expansión), el movimiento de aire se establece en forma continua pero por poco tiempo, lo que requiere aparatos de medición rápida. El túnel de viento supersónico tiene más bien aplicación en Aeronáutica, para el diseño de aviones de gran velocidad; los túneles de viento subsónicos permiten el estudio de problemas más conectados con la ingeniería civil.

2. SEGÚN EL TIPO DE CIRCULACIÓN²⁸

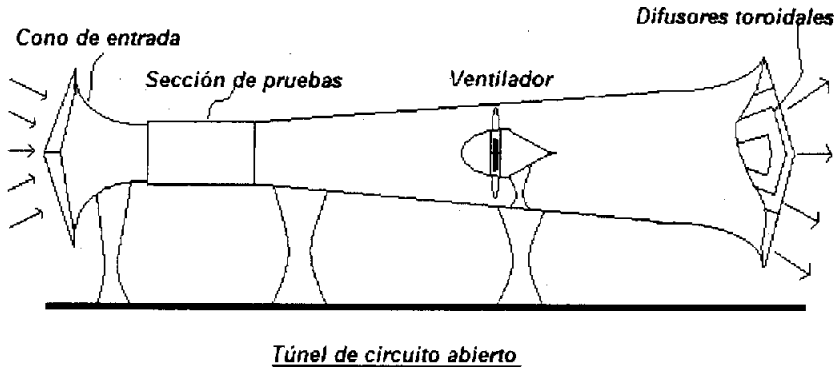


Circuito abierto: El aire se toma directamente de la atmósfera succionándolo con un ventilador colocado después de la sección de pruebas, de manera que el aire pasa a gran velocidad por la misma y es arrojado nuevamente a la atmósfera por medio de difusores concéntricos que dispersan el chorro de aire. Actualmente se usan grandes torres colocadas en la entrada y salida del túnel que sirven para sacar el aire y eliminar los efectos ocasionados por las variaciones de la humedad y la velocidad del viento.

Existen en uso pocos túneles de este tipo debido a las dificultades que presentan para su manejo, sin embargo, en ocasiones pueden tener grandes ventajas cuando se quiere lograr un movimiento de baja turbulencia o una corriente constante de aire limpio para probar motores; pueden ser relativamente más barato en su construcción, pero requiere de más aire disponible, más energía y hace más ruido. El tamaño más comúnmente empleado para satisfacer las necesidades de la

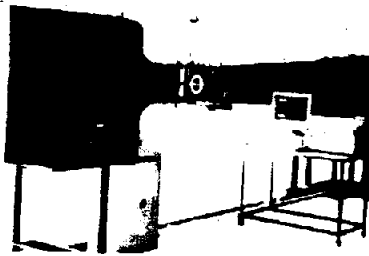
²⁸ Ibidem., pág. 18.

industria y la enseñanza tiene un área de aproximadamente 6m^2 de sección de pruebas, potencias de 300 a 500 HP. Son velocidades de 200 Km/h, este tamaño cae dentro del rango de **túneles de viento de baja velocidad** donde la compresibilidad del aire es despreciable y se pueden lograr números de Reynolds de 2.5×10^6 para modelos de 60 cm, son económicos, fáciles de construir, de operación sencilla y se obtienen mediciones suficientemente precisas.



AF6109 TÚNEL DE VIENTO CIRCUITO ABIERTO

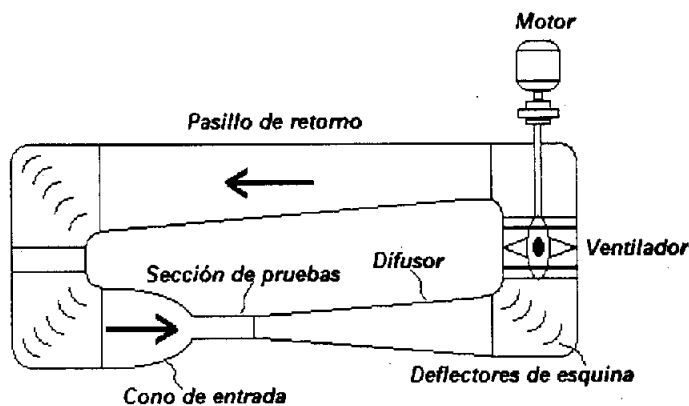
Realizado para el estudio del flujo de una corriente de aire en la conducción y del comportamiento de modelos de perfiles alares y figuras geométricas en una corriente de aire uniforme en el interior de una cámara de prueba cerrada. Características: sección de la cámara de prueba 210 x 360 mm, visores para la observación de modelos, velocidad máx. de aire 28 m/s variable con continuidad. Pruebas principales: distribución velocidad y presión, número de Reynolds, visualización de los filetes fluidos en tuberías, fuerzas existentes sobre modelos y distribución de presiones sobre perfiles.²⁹



²⁹ <http://delorenzo.dynu.com/esp/prods/mecanica/aero/#arriba>

Retorno simple: Se le llama también tipo Prandtl ó Göttingen, y tiene la gran ventaja de permitir el control de aire (temperatura y humedad) y la disminución de turbulencia por medio de aletas conectoras de flujo en las equinas, además de que el ventilador ayuda mucho a estabilizar las variaciones del flujo introducidas por el modelo de prueba. Se dispone de una sección de pruebas con ventanas, que facilita la observación del modelo, la instalación de instrumental de medición es relativamente simple, el túnel tiene varias puertas de acceso e iluminación interior para facilitar el aseo e inspección del túnel.

En general solo los túneles de viento con problemas especiales optan por otro tipo de retorno. Ahorra más energía (solo gasta la necesaria para restaurar las pérdidas por fricción), no necesita de tanto aire disponible pero resulta mucho más costosa su fabricación y montaje.

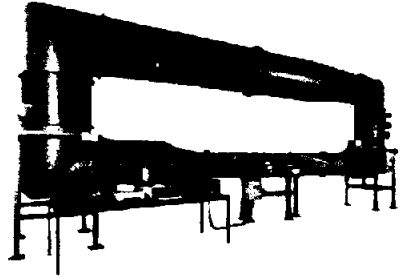


Túnel de retorno simple

AF64 TÚNEL DE VIENTO CIRCUITO CERRADO

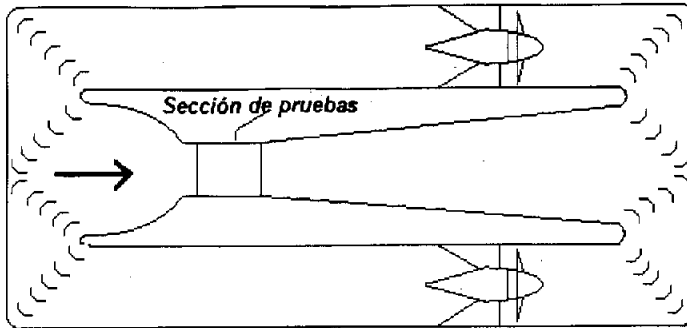
Realizado para el estudio de perfiles y figuras geométricas de grandes dimensiones en una corriente de aire uniforme de alta velocidad. Características: sección de la cámara de prueba 300 x 550 mm, visores para la observación de los modelos, velocidad máx. de aire 45 m/s variable con continuidad.

Principales pruebas: medidas de resistencias, de capacidad aerodinámica y de momento de picada de modelos o de perfiles alares con inclinación regulable respecto al viento, medidas de distribución de presión sobre perfiles alares u otros modelos. El flujo del viento es generado de un ventilador con caudal de aire variable, $\phi 710$ mm, presión total 117 mm H₂O, potencia requerida 16.5 kW, rodete helicoidal con perfil alar con paso variable en marcha. El ventilador es accionado por un motor asíncrono de jaula. Los instrumentos base comprenden 2 tubos Pitot, 3 manómetros diferenciales, 4 tomas estáticas de presión, 1 termómetro con bola sumergida, 1 termómetro ambiente, 1 multimanómetro con 10 canales y 1 perfil alar NACA 23012 con 10 tomas de presión.



Retorno doble: Este tipo de túnel se ha utilizado cuando se requieren bajas velocidades en la sección de prueba a costa de incrementos notables en el área de la misma y en el área de las secciones de los pasillos de retorno. Un ejemplo de este túnel es el de Langley Field construido para pruebas, en prototipo, con el cual se logran velocidades de 190 Km/h y su sección de pruebas es de 18 m de ancho x 9 m de altura y que permiten probar aviones pequeños a escala natural. Para modelos de dimensiones mayores se tiene el inconveniente de la formación de chorro de aire que circula en la proximidad de ellas.

Este chorro central produce vibraciones sobre el modelo y además, si la relación de contracción es muy grande, el flujo se vuelve extremadamente turbulento y difícil para realizar mediciones.

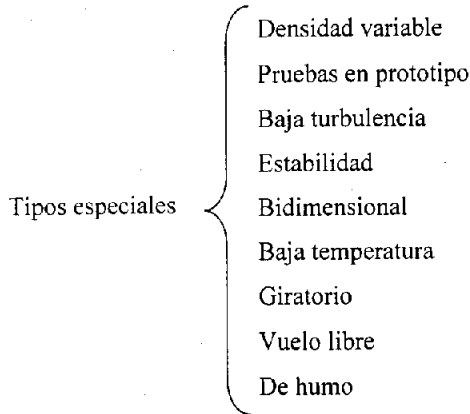


Túnel de retorno doble

Retorno anular: Este túnel se utiliza, cuando las presiones en el interior obligan a una estructura más resistente. Sin embargo aunque esta solución permite una mayor economía, tiene el inconveniente a la inaccesibilidad a la sección de pruebas durante los ensayos, lo que obligan a efectuar mediciones a control remoto, además del inconveniente, ya antes señalado, de la formación del chorro central y de la excesiva turbulencia del aire.

El túnel de ***densidad variable*** de la N.A.C.A. (National Advisory Comittes of Aeronautics) es un ejemplo de este tipo y en él se logran alcanzar presiones de 20 atm con la ventaja adicional de obtener número de Reynolds mucho mayores, imposibles de alcanzar en los túneles sin presión.

3. TIPOS ESPECIALES³⁰



Densidad variable: El túnel lo fabricó la N.A.C.A. con el propósito de lograr números de Reynolds muy altos mediante grandes presiones, es el pionero de los túneles de presión y debido a los problemas estructurales se hizo de retorno anular, el flujo es extremadamente turbulento y las mediciones son muy precisas y solo se empleó con aires cualitativos, actualmente este túnel es usado como tanque de presión para túnel supersónicos.

Escala natural: Se construyó en Langley Field y es capaz de probar aviones pequeños a escala natural en condiciones cercanas al vuelo. Esta constituido por un edificio cuyas paredes forman un doble canal de retorno y tiene la ventaja que puede ser revisado el prototipo, y se puede construir modelos de aviones grandes (Francia).

Baja turbulencia: El primer túnel de baja turbulencia fue construido en 1946 por la N.A.C.A. y éste efecto se logró con un sistema para trabajar con el aire a

³⁰Dario F. de Hoyos P., Op. Cit., pág. 18.

presión, además se proyectó con una relación de contracción de 25 a 1, estas medidas que se tomaron para disminuir la turbulencia en la sección de pruebas dieron bastante buen resultado.

Estabilidad: En este túnel se hacen pruebas de vuelo libre sobre modelos mediante un chorro de aire horizontal que puede variar de dirección y permite simular el vuelo libre del avión, el modelo se mantiene en suspensión mediante un ahorro de aire vertical.

Con este túnel se lograron experimentos muy valiosos para el uso de planeadores y el diseño estructural de aviones.

Bidimensional: Este tipo se usa para conocer los efectos del aire en perfiles aerodinámicos tomando en cuenta solo dos dimensiones, tienen una turbulencia muy baja y se han construido túneles que pueden adaptarse a pruebas bidimensionales cambiando solo la parte de la sección de pruebas.

Baja temperatura: Este túnel se utiliza para conocer el efecto de las bajas temperaturas para aviones que vuelan a grandes velocidades y a gran altura, sujetos a bajas temperaturas.

Giratorio: Es un túnel de grandes dimensiones cuya sección de prueba es en forma de anillo y el modelo está montado sobre un brazo giratorio, se pueden hacer combinaciones con la velocidad axial del túnel y la velocidad tangencial del brazo giratorio, lo que permite medir los efectos de una corriente curvilínea. Se usa también para probar anemómetros.

Vuelo libre: buscan simular el planeo de los aviones, son de circuito y sección abierta, donde se deja caer el modelo bajo la acción de la gravedad y el flujo del aire. Otro factor importante de un avión es la tendencia que tenga a dar giros después de entrar en pérdida, para lo que se usan "spin tunnels" que son túneles de viento

verticales, en los que el aire fluye hacia arriba; el modelo se coloca dentro y se filma durante la pérdida y su recuperación, para ser estudiado después con detenimiento.

De humo: Los túneles no van dirigidos exclusivamente al diseño de aeronaves, sino también al de automóviles, bicicletas, edificios, a simular la propagación de incendios y de contaminantes atmosféricos. Los túneles también sirven para visualizar el flujo, como es el caso de los **túneles de humo** en los que se utilizan fuentes de aceites vaporizados para marcar líneas y trayectorias en el fluido.

CAPITULO V

CONSTITUCIÓN DE LOS TÚNELES

1. PARTES CONSTITUTIVAS

Sección de pruebas: Parte más importante del túnel de viento pues corresponde al sitio donde se coloca el modelo y donde se realiza el mayor número de mediciones.

Tanto los requerimientos como los costos determinan el tamaño y velocidad del aire en la sección de pruebas y la potencia requerida por el ventilador. La sección puede tener muchas formas: circular, elíptica, rectangular, cuadrada, hexagonal u octogonal, como las pérdidas debidas a su forma son mínimas, la elección de su geometría obedece principalmente a consideraciones aerodinámicas y a la utilidad marginal que represente.

El techo y piso planos hacen muy fácil la instalación de modelos, balanzas aerodinámicas y su calibración. En especial una sección que tenga un alto igual a dos tercios de su ancho es aún más ventajosa pues requiere de menores correcciones.

La tendencia moderna es construir secciones rectangulares que permitan una corriente uniforme con poca turbulencia³¹, así como las facilidades de construcción propias de la sección que permiten el alojamiento de los dispositivos de medición, la iluminación y el montaje del modelo de una manera sencilla y rápida.

Es conveniente que en la sección de pruebas se logren números de Reynolds por lo menos de 1.5×10^6 hasta 2.5×10^6 , las velocidades convenientes para lograr estos números de Reynolds fluctúan entre 200 y 300 Km/h para secciones de prueba de 3 a 6 m².

En el caso de la sección rectangular es conveniente construirla con una relación de altura/base = $\sqrt{2}$. Es común que la longitud de la sección de prueba varíe entre una y dos veces la máxima dimensión del chorro.

El espesor de la capa límite reduce el área efectiva del chorro y produce un incremento de velocidad en la sección y ocasiona una caída de presión local que tiende a succionar el modelo hacia aguas abajo. Este efecto recibe el nombre de flotación horizontal y es conveniente que se incluyan dentro de las mediciones o bien puede evitarse ampliando ligeramente las paredes de la sección de pruebas para mantener constante la presión a lo largo de la sección.

Desgraciadamente no se cuenta con el método de diseño que asegure una presión constante y como primera aproximación se suele dar a las paredes una divergencia de aproximadamente 0.5 grados, que ajusta posteriormente en forma experimental.

³¹ **Reducción de turbulencia, panales y pantallas:** La turbulencia en la sección de pruebas se reduce instalando panales y pantallas antes de la contracción. Las pantallas hacen que la presión tenga una gran caída en el sentido del flujo, lo que reduce de una manera drástica las velocidades altas y de una menos severa las bajas; en ambos casos genera una velocidad axial uniforme. Los panales hacen que la presión caiga de forma moderada, teniendo un efecto menor en la homogeneización de las velocidades axiales, pero debido a su longitud vuelve constantes las velocidades laterales. La longitud mínima de un debe ser de seis a ocho veces el tamaño de la celda.

Es necesario que en la sección de pruebas se tenga la suficiente visibilidad, del modelo hacer la sección transparente o colocar suficientes ventanas, además de una iluminación suficiente y un equipo para tomar fotos de las pruebas. Aunque es más común el uso de sección de pruebas cerradas, en el caso de pruebas de rotores y propulsores, la sección de prueba con el chorro abierto (sin paredes) ofrece ventajas considerables para las mediciones.

Pasillo de retorno: Las pérdidas de potencia por fricción en un túnel de viento varían con el cubo de la velocidad, por lo cual es recomendable ampliar paulatinamente el área transversal del túnel en el circuito de retorno con el fin de reducir la velocidad tan rápido como sea posible, sin incrementar mucho la pérdida por difusión. Para esto se recomiendan expansiones máximas de 5° a 8° entre paredes opuestas y para expansiones en un solo sentido hasta 12° .

El difusor es particularmente importante entre la sección de prueba y el primer codo, debido a que en esta esquina se tienen pérdidas bastante importantes, ya que todavía no se logra disminuir suficientemente la velocidad del aire. Es conveniente hacer bruscamente los cambios de dirección colocando alabes deflectores en las esquinas para guiar el flujo de tal manera que se eviten las turbulencias propias de los codos.

El retorno en túneles de tipo anular o de retorno doble se hace a velocidades más lentas pero en la entrada de la sección de prueba se puede evitar la turbulencia que produce el choque de los chorros de aire que convergen al cono de entrada.

En el pasillo de retorno deben construirse accesos suficientes para la inspección y limpieza del túnel, además de la iluminación necesaria para una buena visibilidad.

Sistema de correctores de flujo:

- a) **Guías de flujo de los codos:** En los codos del túnel se produce una perturbación local del flujo que ocasiona una pérdida de energía. Debido al cambio de dirección se produce un incremento de presión en la parte de afuera acompañada por una disminución de velocidad y en la parte interior hay disminución de presión y aumento de velocidad, esto provoca corriente helicoidales que son muy persistentes y que producen asimetría en el flujo. Se ha observado que produce mejores resultados construir cambios de dirección bruscos, colocando, en adición una serie de guías verticales que eviten las turbulencias propias del cambio brusco de dirección y disminuyen las pérdidas propias del codo.
- b) **Correctores del ventilador:** Se colocan en la sección del ventilador para corregir el movimiento helicoidal del viento debido a la rotación de la hélice del ventilador. Su diseño se hace al mismo tiempo que el de la hélice, formando todo, un conjunto con el cubo del ventilador. La disposición de estas aletas es en direcciones radiales y sirven también para darle apoyo al cubo del ventilador.

Se ha encontrado experimentalmente una forma aerodinámica para cuerpos que se mueven sobre una trayectoria recta girando a la vez sobre su propio eje como es el movimiento de los torpedos o el de los zeppelines, se puede asimilar la forma del cubo del eje del ventilador tomando en cuenta que el movimiento relativo en ambos casos es semejante.

La forma del cubo del ventilador esta compuesta de un elipsoide de revolución al frente, un cilindro después una transición formada por una sección del elipsoide y termina con un cono.

El tamaño más conveniente de diámetro del cubo es de 0.3 a 0.7 del diámetro de la sección, sin embargo un cubo muy grande trae grandes problemas de espacio. Generalmente se coloca en el pasillo de retorno o entre el segundo y primer codos y se recomienda expansiones de 6 a 7 grados.

- c) **Panales:** Si después de construido el túnel, la turbulencia del aire está por arriba desnivel satisfactorio (aproximadamente 1.7 para túneles pequeño y 1.4 para túneles de baja turbulencia) los panales reducen la intensidad de la turbulencia.

Se colocan antes del cono de contracción y consiste en una serie de panales³² formados por perforaciones hexagonales que tienen por objeto regularizar el flujo antes del cono de contracción y garantizar una distribución perfectamente uniforme de las velocidades en la sección de prueba ya que de ello depende el éxito del funcionamiento general del túnel.

Debe ponerse la sección después de las persianas suficientemente alejada de la sección de pruebas para que se alcancen a disipar las turbulencias locales provocadas por los panales, el monto del empuje sobre las persianas es bastante grande y en casi todas las instalaciones hechas se llevan de 5 a 20% de la potencia total del túnel.

Ventilador: Aunque muchos túneles de viento tienen colocado el ventilador después de la segunda esquina aguas debajo de la sección de pruebas, se ha visto que ésta no es la mejor posición, las ventajas de colocar después de la segunda esquina son de seguridad para protegerlo contra objetos o pedazos del modelo que pueda desprenderse en la sección de pruebas y además asegurar que cuando el aire

³² Los panales generalmente son de forma hexagonal, cuadrada o cilíndrica.

llegue al ventilador ya haya recorrido un espacio suficiente que establezca nuevamente la corriente. Sin embargo esto es relativo, pues en realidad las dos esquinas hacen que el flujo sea bastante irregular.

Por otra parte el ventilador tiene un costo proporcional al cuadrado del diámetro y se logran las eficiencias máximas justamente con grandes velocidades de llegada. Por lo tanto se ha visto que la localización más conveniente del ventilador se encuentra entre la primera y segunda esquinas con la condición de colocar malla protectora antes de la hélice, o bien antes de la primera esquina.

Esta posición tiene además la ventaja de estar localizada después del primer difusor por lo que el aire llega un poco más atenuado y el movimiento del ventilador corrige en parte las irregularidades del flujo provocadas por el modelo de prueba.

La hélice de un túnel de viento y la de un avión son aparentemente iguales pero las condiciones peculiares de su funcionamiento las hace diferente.

En el ventilador del túnel de viento se toma en cuenta la ley de la continuidad para el flujo a través de un tubo y se considera una velocidad mayor en el ventilador debido al estrechamiento de la sección, además la rotación que se le imprime a la corriente es de primera importancia y puede llegar a ocasionar pérdidas de energía que hagan un segundo ventilador para corregir el flujo. Para resolver este problema se había mencionado ya el uso de alabes radiales correctores de flujo sencillos antes o después del ventilador o bien mediante un segundo ventilador de rotación opuesta que anule los efectos del primero.

Los ventiladores de rotaciones contrarias eliminan totalmente la rotación del flujo para todas las velocidades y potencias posibles. Por su puesto los ventiladores opuestos se diseñan para dar un empuje mayor que uno solo y se usan en instalaciones de alta potencia.

Para túneles de tamaños moderados generalmente es suficiente con utilizar un ventilador simple y se pueden diseñar los alabes rectificadores que trabajen adecuadamente para todas las velocidades del túnel.

Cono de contracción: Como una reducción brusca en el área de la sección genera desprendimientos y turbulencias, en la entrada de esta se coloca un cono que reduce de manera gradual el área, al que se le llama contracción de manera similar, al terminar la sección de pruebas hay un tramo llamado difusor, encargado de aumentar el área y disminuir la velocidad del aire.

Dicho cono tiene como objeto acelerar el movimiento del aire con la pérdida mínima y determina el tamaño del túnel. Además del aumento de velocidad, el cono de contracción debe tener una forma adecuada para garantizar que en la sección de pruebas se produce un flujo regular con una distribución uniforme de la velocidad en toda la sección.

Si es muy grande la curvatura de la pared a lo largo de la dirección del flujo, las velocidades locales en algunos puntos pueden ser mayores que la velocidad al final del cono de entrada. Existen regiones de gradiente de presión adverso y la capa límite puede separarse de la pared. Además si la velocidad al final del cono de entrada es cercana a la del sonido entra en juego un factor adicional que es la barrera sónica y este peligro puede ser evitado manteniendo la velocidad del flujo debajo de la del sonido en todo campo.

Los dos problemas que debe superar un cono de contracción tienen que ver con su geometría; primero, se produce un gradiente de velocidad opuesto al deseable en la entrada y salida de la contracción, lo que puede generar un desprendimiento, aumentando la potencia y disminuyendo la calidad de la medición. Además, la superficie de las líneas de flujo de una contracción rectangular se choca con sus propias paredes, lo que genera un flujo secundario, responsable del

desprendimiento y la reducción de la velocidad, esto puede solucionarse haciendo un filete en el cono de contracción.

Las mayores velocidades se localizan en la pared de manera que si se hace crecer la velocidad monótonamente a lo largo de ésta, se logran en todo el campo de velocidades menores que la del sonido. En forma semejante la presión a lo largo de la pared deberá decrecer monótonamente para evitar el peligro de separación de la capa límite.

Actualmente el diseño de la contracción usando la hidrodinámica de los fluidos compresibles es muy complicado, sin embargo mediante investigaciones teóricas y experimentales se ha encontrado que se puede atacar el problema considerando al fluido incompresible mediante un coeficiente que depende de la velocidad del fluido.

Para el diseño de la parte final del cono de contracción que es la más delicada y para fluidos incompresibles, se propone una variación monótona y unos perfiles adecuados para el caso del cono de contracción cilíndrico, pero resulta un perfil de dudoso funcionamiento para el caso de sección rectangular.

Se puede recurrir también a trazar la red de flujo proponiendo una forma y revisar las velocidades y las presiones a lo largo de la pared.

Gran parte del éxito del funcionamiento de un túnel está basado en la forma del cono de contracción y su diseño generalmente se hace por medio de modelos reducidos a escala para comprobar su buen funcionamiento. Con el advenimiento de los computadores y de los métodos numéricos se han podido implementar programas que simulen el papel de las contracciones, evitando hacer piezas reales inútiles. Muchas veces aunque no se construya el túnel a escala y se simule, algunas partes se realizan, como la contracción, la sección de pruebas y la difusión que son

críticas en el éxito del túnel, de forma que se pueda medir previamente su sensibilidad a flujos no uniformes.

Respiradero: Si el túnel es operado con un chorro abierto, en la sección de prueba existe la posibilidad de que haya vibraciones en el chorro, las cuales dependen de la longitud del chorro y pueden llegar a causar disturbios serios. Para eliminar dichas vibraciones se suele practicar una muesca (de aproximadamente 5% del ancho de la sección de prueba) al principiar el difusor y que está conectada con el exterior. Esta sobre todo es conveniente en el caso de que las velocidades de prueba sean superiores a 300 Km/h.

En túneles con el chorro cerrado suelen ocurrir vibraciones semejantes y el respiradero se coloca después de la sección de pruebas con el objeto adicional de reponer el aire que se pierde durante su recorrido pudiendo ser del mismo tamaño que en el caso anterior. Esta ranura se cubre con una malla fina de alambre para reducir la cantidad de polvo que pudiera entrar al túnel.

Debe evitarse en lo posible la vibración en cualquiera de las partes del túnel de manera de no provocar ruidos molestos y fundamentalmente para evitar las fallas por fatiga del material. En ocasiones se pueden calcular dichas vibraciones teóricamente, pero en otras debe esperarse a que esté construido el túnel para probarla vibración de las piezas. Es muy importante evitar al máximo las vibraciones en la sección de prueba y en los apoyos de la balanza de medición.

Difusor: Debido a que las pérdidas a través de un ducto varían proporcionalmente con el cubo de la velocidad, el objetivo del difusor es reducir la velocidad expandiendo el fluido y recuperando la presión estática, el difusor está dividido en dos partes por el ventilador. Los difusores son muy sensibles a errores de diseño, pueden crear separación de la capa límite de manera intermitente o estable, que es difícil de detectar y puede causar vibración en el túnel, oscilación del ventilador y variación en la velocidad de la sección de pruebas.

El diseño del difusor resulta ser clave en el éxito del túnel, pues es necesario encontrar el punto óptimo para aumentar el área, sin permitir que la capa límite se desprenda. Los difusores se describen con la relación entre las áreas de entrada y salida o con el ángulo equivalente de cono, que es el ángulo que surgiría al trazar un cono truncado entre el área de entrada y la de salida. La relación de áreas recomendada debe ser de cinco o seis a uno y el ángulo debe ser de siete grados o menos.

Hay que tener en cuenta que al difusor no le llega un flujo laminar, el aire que sale de la sección de pruebas no es uniforme lo que hace aún más difícil el papel del difusor.

2. SELECCIÓN DEL TIPO Y DIMENSIONES DEL TÚNEL

La selección del tipo de túnel de viento más conveniente se puede hacer desde el punto de vista de la velocidad y el tamaño de la sección de pruebas o atendiendo a la forma de hacer circular el aire.

2.1. DIMENSIONES SEGÚN EL ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO

Para dimensionar un túnel se procede al análisis del tamaño en función de la potencia del túnel y de la velocidad del aire en la sección de pruebas para lo cual se procede como sigue:

- 1) *Elección de la geometría del túnel*

- a) Sección de pruebas
- b) Sección del ventilador
- c) Cámara de tranquilización
- d) Pasillo de sección de paneles
- e) Difusores
- f) Cono de contracción
- g) Pasillo anterior al cono de contracción
- h) Codos

- 2) *Cálculo de las pérdidas de energía en la conducción mediante una expresión que relacione el coeficiente de pérdidas con los valores de coeficiente de fricción.*
- 3) *Determinación de la relación de energía y comprobación de la potencia del motor.*
- 4) *Calculo geométrico del cono de contracción, de los difusores y del pasillo del ventilador.*
- 5) *Diseño de la hélice.*
- 6) *Diseño del huso del ventilador.*
- 7) *Diseño de los panales.*
- 8) *Diseño de los intercambiadores de aire.*

1. MECANISMOS**Motor: (consideraciones)**

- a) Dar diferentes velocidades del aire dentro del túnel, fundamentalmente con una hélice de paso variable, lo que permite tener un motor de velocidad constante.
- b) La velocidad de rotación del motor queda fijada por el diseño de la hélice.
- c) El motor que ofrece mayores ventajas es el de jaula de ardilla.
- d) El motor debe estar convenientemente protegido con un arrancador para evitar que tome mucha potencia a la hora de arrancar y se queme la línea.

Hélice del ventilador: (consideraciones)

- a) Analizar el sistema de alabes correctores del ventilador como parte integrante del mismo. Se colocan después de la hélice y sirven para corregir el flujo helicoidal que nos proporciona la hélice y para sostener el cubo del ventilador.
- b) Factores que influyen: velocidad axial del viento, velocidad de rotación de la hélice, diámetro local de la circunferencia.
- c) Perfil de la hélice, el número de aspás mínimo son cuatro, para asegurar que las pulsaciones de la corriente no sean altas, por otro lado los esfuerzos estructurales determinan también el número de alabes.

Transmisión: (Consideraciones)

Se puede controlar la hélice con un motor colocado afuera del túnel y unido al ventilador mediante una flecha.

- a) Cuando el cubo del ventilador lo permite se puede alejar el motor dentro del mismo cubo, de manera de evitar la transmisión.
- b) La instalación debe hacerse cuidadosamente para evitar rozaduras o torsiones en la flecha, que pueden producir fuertes vibraciones en la hélice que llegan inclusive a ocasionar el colapso del aspa.
- c) Es conveniente que la flecha se apoye en varios caballetes colocados convenientemente para evitar efectos de resonancia, de tal manera que las turbulencias producidas por los caballetes se disipen con el efecto del ventilador.
- d) Para lograr velocidades diferentes se varía la velocidad de rotación de la hélice por medio de engranes y bandas de transmisión.

1.1. CONTROLES ELÉCTRICOS DEL TÚNEL

Puesto que se trata de obtener una variación de la velocidad de la corriente de aire en el tramo de pruebas, lo más amplia posible. Son muy variados los métodos existentes para lograr este objetivo. El primer método consiste en hacer variar la velocidad angular del ventilador (rpm). Un segundo método, con serias limitaciones, consiste en dotar al ventilador de un mecanismo para hacer variar el paso de la hélice del ventilador. Un tercer método es el de equipar el túnel con uno o varias mamparas que proporcionen una variable resistencia al flujo de aire.

El primer método es el más sencillo y de menor costo. Esto permite variar la velocidad de la corriente en forma continua dentro de los límites establecidos por las curvas características de velocidad del ventilador. Por lo que respecta al método de

variar las rpm del árbol del ventilador, se consideran aquellos dispositivos que proporcionan un gobierno de dicha variación. El hacer variar la velocidad es por medio de mecanismos de engranajes no es económico por tratarse de una operación a potencia constante aproximadamente y de difícil mantenimiento. Queda pues solamente el método de hacer variar las rpm del motor.

Así pues, hay distintos tipos de motores y sus diferentes arreglos empleados corrientemente en los túneles de viento, tomando en cuenta solo aquellos susceptibles de un control por variación de velocidad.

1.2. MÉTODOS DE MOVER LA HÉLICE DEL VENTILADOR

Grupo motor: Generador y motor de C. D.³³ Un generador de corriente directa acoplado mecánicamente a un motor de C. D. en el túnel, es un sistema adecuado, para potencias menores de 500 HP. El costo resulta prohibitivo arriba de este valor. Con este sistema puede controlarse la velocidad muy fácilmente.

Rectificadores y motor de C. D.: Se trata de un sistema de velocidades variables que emplea rectificadores estáticos para convertir la potencia alterna de entrada a C. D. Para operar un motor de C. D. se emplea en túneles con potencia hasta de 200 HP.

Frecuencia variable: Este arreglo comprende un motor sincrónico acoplado a un generador de C. D cuya potencia de salida se emplea para mover un motor de C. D. que a su vez acciona un alternador. A la salida de este alternador se conecta el motor del ventilador, que puede ser un motor de inducción o un motor síncrono. Este es un buen sistema pero muy caro.

³³ Corriente Directa.

Acoplamiento magnético: Se puede emplear un motor síncrono para mover el ventilador a través de un acoplamiento magnético de velocidad variable. Este es uno de los arreglos menos costosos, por lo que respecta al costo inicial; pero tal vez uno de los menos atractivos desde el punto de vista del costo de operación. Se emplea por lo tanto en túneles de baja potencia solamente.

Motor de jaula de ardilla de velocidades múltiples: Se trata de un motor de inducción diseñado para operar a varias velocidades escalonadas, que puede usarse en combinación con un ventilador de paso variable. Se emplea solamente en instalaciones de potencia menores de 2500 H. P.

Motor de inducción de motor devanado: En general no puede esperarse cambios amplios en las *rpm*, buen gobierno o alta eficiencia de un motor de este tipo, aunque ha sido empleado con algún éxito en combinación con un ventilador de paso variable. El costo inicial es bajo y el motor relativamente pequeño para su instalación en un túnel.

Motor de inducción de alimentación doble: Este arreglo requiere una fuente de potencia de frecuencia variable como en el *motor de jaula de ardilla de velocidades múltiples*, que alimenta a un motor de inducción. Su costo de adquisición es elevado; pero es tal vez el dispositivo motor más ampliamente usado para las instalaciones de muy alta potencia en las que la eficiencia es importante.

Motor de combustión interna: El empleo de un motor de combustión interna no es conveniente, ni desde el punto de vista del costo de operación, ni desde el de la confiabilidad. Por la razón de que falta una corriente de aire para enfriar la máquina estacionaria y con un mantenimiento inexperto; las máquinas de pistones raras veces duran en un túnel lo que duran en un vehículo o aeronave, siendo la vida media de 300 horas de una máquina típica. Una dificultad con estas máquinas es que las

bujías se ensucian bajo las condiciones de baja carga encontradas frecuentemente en la operación de un túnel.

2. INSTRUMENTAL

Los aparatos más usados que permiten la medición de la presión, la velocidad o la dirección del flujo, sobre el modelo o para la calibración del túnel son los siguientes:

1) *Manómetros (simples y múltiples)*

Manómetros y multimanómetros de alcohol o de agua de tipo diferencial. Estos se conectan a tubos de Pitot, piezómetros, rastrillos de estela, etc., que se utilizan para medir las presiones dinámicas y estáticas dentro del flujo.

Simples: Para la medición de presiones estáticas del flujo, por medio de una columna de líquido que mide la presión dentro de un tubo "U" comunicado con la corriente.

El fluido más comúnmente usado es el alcohol por ser barato, fácil de obtener, de baja viscosidad y de menor peso específico que el agua lo cual lo hace más sensible a las mediciones mediante la producción de mayores columnas de líquido. El peso específico del alcohol varía moderadamente con la temperatura, algunas veces se necesitan líquidos más pesados que el alcohol o el agua para poder medir un rango mayor de presiones.

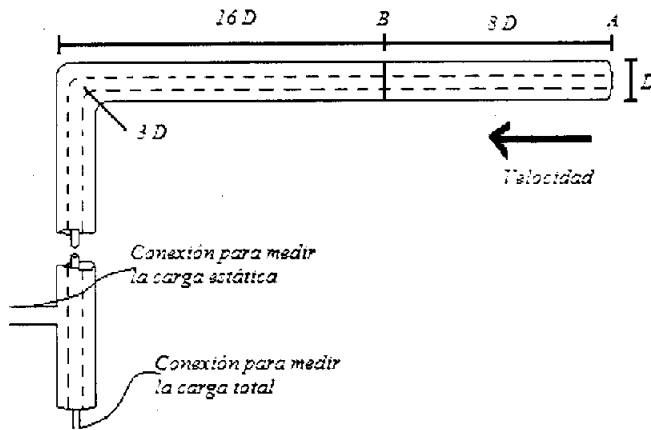
Cuando se utiliza la fotografía como medio de medición se requieren tintas para colorear el líquido en la columna.

Múltiples: Hay dos tipos,

- Una serie de tubos colocados frente a una placa translúcida e iluminados por detrás de la misma, y
- Una serie de tubos colocados sobre una placa maciza iluminados por el frente.

2) Tubo de Pitot

Aparato más común para medir la carga total y la carga estática de un fluido en movimiento en diferentes puntos de la zona de pruebas.



Tubo de pitot de la carga estática

34

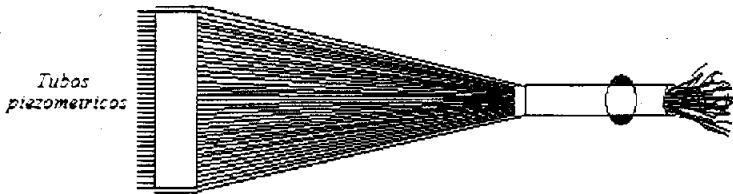
3) Rastrillos

Consiste en sistemas de tubos que miden la carga total y están colocados en forma de rastrillo con una separación entre ellos de 1/8 de pulgada; normalmente se emplean tubos de 1/16 de pulgada.

Es importante para lograr precisión en las mediciones que el espacio lateral sea exacto, que se monten los tubos sobre un soporte de tal manera que queden perfectamente alineados y que las puntas estén sobre un solo corte.

³⁴ Darío F. de Hoyos P., Opt. cit., pág. 62.

Son muy eficientes y registran rápidamente cualquier cambio de presión. Frecuentemente se requiere revisar alguna lectura por medio de un tubo de Pitot de carga estática y para ello se debe tener la precaución de no acercarlo más de una pulgada del rastrillo.

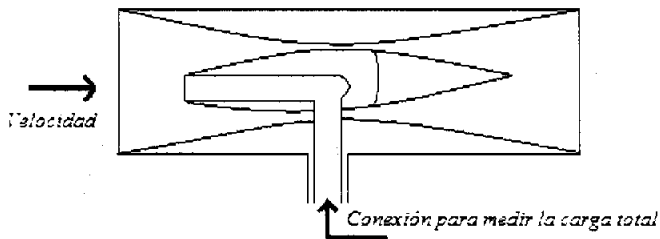


Rastrillo

35

4) Tubos de Kiel

Son tubos de Pitot que nos miden cargas totales que evitan el problema que se presenta en el tubo de Pitot al variar la dirección del flujo para lo cual están arreglados de tal manera que las lecturas no varían para un amplio rango de deflexiones, es un aparato muy útil para medir en lugares donde es incierta la dirección del flujo.



Tubo de Kiel

36

³⁵ Loc. cit.

³⁶ Loc. cit.

5) Termómetros

Tipo estándar protegidos. Se usan para determinar la temperatura de funcionamiento del túnel.

En túneles de baja velocidad es suficiente un termómetro para medir la temperatura y es aconsejable llevar un control de ella pues el número de Reynolds varía en un rango bastante grande con la temperatura del túnel.

6) Indicadores de la dirección del flujo

Se utilizan para obtener líneas de corrientes y desviaciones del flujo en la zona de pruebas.

Existen dos tipos de indicadores: *los de aleta y los de esfera*, los primeros no son muy eficaces siendo más usados los últimos que consisten en una esfera con dos orificios separados 90° entre sí. Obviamente cuando están alineados con respecto al flujo miden la misma carga de presión y a medida que es mayor la desviación del flujo es más grande la diferencia de presiones entre los orificios.

7) Anemómetros de hilo caliente

Se utiliza para detectar las fluctuaciones de la velocidad del flujo en diferentes puntos de la zona de pruebas y en la vecindad de las fronteras.

Consisten esencialmente en un hilo de platino de diámetro muy pequeño (0.015 mm), de longitud corta (10 mm), el cual se coloca dentro de la corriente de tal manera que la longitud sea perpendicular a la dirección del flujo. El hilo se calienta mediante una corriente eléctrica hasta una temperatura tal que las variaciones de la corriente producen fluctuaciones de temperatura en el hilo y que afectan su resistencia al paso de la corriente eléctrica. Ello produce cambios de voltaje en el circuito que son amplificados con amplificadores de tubos al vacío, lo cual permite la lectura de los valores medios de los cambios de corriente mediante miliamperímetros de gran sensibilidad.

Se puede obtener más rapidez en la respuesta ya sea colocando hilos más pequeños o haciendo modificaciones en los circuitos eléctricos que consisten básicamente en cambiar de tipo de corriente eléctrica de directa a alterna.

8) Ultramicroscopios

Son aparatos que permiten medir la velocidad de la corriente y se basan en el siguiente fenómeno.

Si un observador viaja a la misma velocidad de una corriente de aire, ve las partículas de polvo como puntos luminosos y si la velocidad del observador es mayor o menor que la del aire, las partículas de polvo se vuelven invisibles.

El ultramicroscopio posee un objetivo móvil rotatorio diseñado de tal modo que la velocidad de rotación pueda ser cambiada hasta encontrar el rango de velocidades dentro del cual aparecen las partículas de polvo luminosas, el que coincidirá con el rango de variación de la velocidad del aire.

9) Aparatos para visualizar el flujo

Para tener una mejor idea del flujo que pasa alrededor de un modelo complicado, además de las medidas de sus efectos sobre el modelo es conveniente conocer la distribución del flujo.

Un método muy utilizado es el que aprovecha el humo para hacer visibles las líneas de corriente. Para este objeto se utilizan algunas substancias que producen humo al contacto con el aire húmedo o bien bombas de humo de carbón.

Esta técnica de humo no es muy recomendable para la mayoría de los túneles que son de retorno ya que este los inunda muy rápidamente. Otro método consiste en una rejilla con hilos en cada intersección, que toman la dirección del flujo en ese punto y dan una idea muy clara de la verticidad del mismo.

Otras veces es preciso averiguar la trayectoria del flujo sobre un modelo y para esto se pinta el modelo con una pintura especial y se coloca un hilo de aproximadamente 5 cm de largo pegado en una esquina al modelo, este hilo se impregna de algún disolvente de tal manera que al pasar el aire marque sobre la superficie la dirección media del flujo en ese punto.

10) Medidores de capa límite

Sirven para obtener la zona de transición de flujo laminar a turbulento, y fluctuaciones de la velocidad en la zona de pruebas.

11) Esfera de turbulencia

Se utiliza para determinar el grado de turbulencia inducida en la zona de pruebas por efecto del ventilador, alabes directores y fronteras del túnel.

12) Productores de humo

Permiten la visualización de algún fenómeno particular en el flujo.

2.1. CALIBRACIÓN DEL FLUJO EN EL TÚNEL

2.1.1. EQUIPO

- a) Transductores eléctricos de presión
- b) Micro manómetro de Betz
- c) Anemómetro de hilo caliente
- d) Tubos de Pitot-Prandtl
- e) Bandas extensométricas

- f) Balanza dinamométrica
- g) Acelerómetros
- h) Equipos auxiliares
- i) Osciloscopio digital
- j) Llaves secuenciales Scanivalve
- k) Voltímetro digital
- l) Generador de señales
- m) Fuente regulable
- n) Contador universal
- o) Amplificador de señales
- p) Placas de conversión analógica-digital
- q) Posicionador de instrumental
- r) Dispositivos de calibración
- s) Computadoras, etc.

Los resultados que se obtienen del ensayo de un modelo en un túnel de viento son confiables, si el flujo en la sección de pruebas es satisfactorio; esto es, un flujo de baja velocidad queda definido cuando se conoce la distribución de las presiones dinámicas, estáticas y totales, el efecto de capa límite de las fronteras, la turbulencia inducida y la temperatura del fluido en la zona de pruebas.

Para lograr un flujo uniforme en la zona de pruebas, es necesario que las características antes mencionadas sean constantes en dicha zona. Para esto es necesario corregir todos los disturbios en el flujo producidos por los diferentes obstáculos que encuentra a su paso dentro del túnel, tales como los codos, las transiciones, la hélice, etc. El procedimiento para determinar estas características se conoce como **calibración del túnel**, y consiste en el ajuste de las partes móviles del mismo (alabes – guías, panales, etc.), hasta lograr el flujo uniforme y con un grado de turbulencia pequeño.

2.1.2. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

El funcionamiento de un túnel depende de la uniformidad del flujo en la sección de pruebas.

Fenómenos característicos de la capa límite.

1. Medición de la capa límite

La capa límite está formada por la porción de fluido más cercana a las paredes, sobre la cual tienen influencia los fenómenos de contacto con la pared y viscosidad de manera que el escurrimiento dentro de esta capa se rige por leyes distintas de las del resto del flujo. La capa límite puede ser turbulenta o laminar dependiendo de las características del flujo, para cada caso la distribución de la velocidad dentro de la capa límite es diferente.

Para averiguar el tipo de capa límite se miden las velocidades del flujo cerca de la pared a diferentes distancias, mediante un medidor de capa límite y se traza el perfil de las velocidades dentro de esa zona.

Este medidor consiste en una serie de tubos de carga total colocados sobre un bastidor, de tal manera que quedan a diferentes distancias de la pared, con lo cual se puede obtener la velocidad del flujo en cada punto con el fin de trazar el perfil de velocidades y determinar además el espesor de la capa límite.

2. Localización del punto de separación o del punto de transición entre la capa límite turbulenta y laminar

Una parte muy importante de las mediciones sobre un modelo, es determinar la zona de transición entre la capa límite laminar y la turbulenta para lo cual hay varios métodos para averiguarlo:

a) Se grafican las distribuciones de velocidad dentro de la capa límite para diferentes puntos a lo largo de la sección transversal del modelo y por medio de esta variación se puede conocer el punto de transición de la capa límite de laminar a turbulenta.

De las gráficas obtenidas en 1) se determina la distribución de velocidad a lo largo del perfil. Para una sola distancia a la pared se obtiene una distribución como la siguiente:

- Se lee la presión estática cerca de la pared y se detecta la zona de transición por una ligera depresión en la gráfica de presión estática contra % de la cuerda³⁷.
- Se lee la presión dinámica cerca de la pared y se señala el valor mínimo de q en la gráfica de q contra % de la cuerda como la zona de transición.
- Se registra q y la presión estática o la carga total y anotamos el punto de transición cuando hay ligeras oscilaciones en la columna.
- Se lee la velocidad sobre la capa límite con un anemómetro de hilo caliente y anotamos el principio de la transición donde se tiene mínima velocidad.
- Se lee la velocidad en la capa límite con un anemómetro de hilo caliente y se tiene la zona de transición donde son inestables las mediciones de velocidad.
- Mediante pequeños orificios se emiten pequeñas cantidades de humo donde se empieza a disipar el humo se tiene la transición.
- Se pinta el modelo con tintas especiales que evaporan lentamente, la evaporación se produce más rápidamente en la zona turbulenta.
- Se puede oír la capa límite con un estetoscopio de doctor conectado al tablero de tubos de carga total, los cuales se mueven progresivamente sobre la superficie del modelo. En la capa límite laminar se oye un siseo que es diferente cuando se pasa a la turbulencia.

³⁷ Loc. cit.

Variaciones de la velocidad del chorro en la sección de prueba

1. Variaciones en magnitud

Por medio de un tubo de Pitot se puede conocer la variación de la presión dinámica en la sección y se obtiene la velocidad local.

El tubo Pitot se mueve sobre la sección de pruebas obteniendo medición a manera de formar una retícula de puntos, se calculan las velocidades locales y se trazan las curvas isotacas. La variación de la presión que no debe ser mayor de 0.5% de la media o sea que la velocidad no debe variar en más de 0.25%. Las variaciones excesivas se pueden corregir por varios procedimientos, es de esperarse que el flujo no sea uniforme sobre todo cerca de las paredes, esto se remedia con ligeros cambios en las guías de esquina, se pueden colocar panales antes del cono de entrada o se puede modificar el cono de entrada para logra mayor uniformidad del flujo.

2. Variaciones angulares

Se pueden medir con un medidor de deflexiones y aunque muchos túneles tienen variaciones angulares de 0.75° a 1° es recomendable para pruebas de precisión variaciones menores de 0.5° .

Las variaciones grandes, distorsionan mucho la distribución de la presión sobre el modelo y desgraciadamente la variación angular cambia con la velocidad del aire, así que para cada velocidad necesitan hacerse los ajustes en las guías de flujo para tener una perturbación mínima.

Turbulencia del túnel

La discrepancia observada entre las mediciones hechas en diferentes túneles de viento para los mismos números de Reynolds y las hechas en prototipo, indican que es necesario hacer correcciones por el efecto de turbulencia que se genera en el

túnel de viento por la acción de la hélice, las guías de flujo y la vibración de las paredes del túnel.

El efecto de la turbulencia es semejante para el flujo en el túnel y para el aire libre por lo que se puede hablar de un número de Reynolds efectivo.

La turbulencia varía un poco sobre la sección transversal del chorro y probablemente disminuye a medida que la sección se aleja del cono de entrada.

Los factores de turbulencia varían de 1 a 3 y los valores más altos se han observado en el centro del chorro de los túneles de retorno doble. En general los valores mayores a 1.4 indican una turbulencia grande para obtener buenos resultados en las pruebas.

Para turbulencias excesivamente grandes las correcciones ya no son muy exactas y las mediciones son muy difíciles de interpretar.

Se puede lograr una turbulencia baja usando un número máximo de alas en el ventilador, unas guías antirrotacionales de gran longitud después del ventilador, un cubo del ventilador de forma gradual y dando una distancia máxima entre el ventilador y la sección de pruebas.

Anteriormente se tenía la creencia de que una relación de contracción grande reducía la turbulencia por si misma, actualmente se ha observado que si bien disminuye las variaciones longitudinales de la velocidad aumentan las transversales de tal manera que la reducción neta es muy pequeña pero las grandes relaciones de contracción traen consigo una distancia mayor entre el ventilador y la sección de pruebas y también es mayor la distancia a las guías de esquina por lo cual baja la turbulencia y además proporciona velocidades bajas para colocar persianas con una pérdida de presión mucho menor.

2.2. MEDICIONES EN MODELOS

Cuando un modelo se somete a la acción del viento, se puede obtener la siguiente información:

1. Alteración del flujo por efecto de la forma geométrica de la estructura; se determina mediante la visualización del flujo.
2. Empuje y sustentación del efecto dinámico del flujo sobre la estructura. Se obtienen en tres formas:
 - 2.1. Con la balanzas diferenciales.
 - 2.2. Mediante integración de las presiones detrás de la estela por medio de rastrillos.
 - 2.3. Vibraciones inducidas por el flujo sobre la estructura, a interacción entre esta y el escurrimiento.

2.2.1. INSTRUMENTOS NECESARIOS

Piezómetros: Para medir las presiones directas sobre los modelos y obtener la fuerza de arrastre y sustentación por integración.

Rastrillo de estelas: Para medir las presiones dinámicas detrás de la estela e integrar la fuerza de arrastre.

Productores de humo: Para la visualización del flujo alrededor de la estructura.

Anemómetro de hilo caliente: Para medir fluctuaciones de la velocidad en cualquier punto sobre la frontera de la estructura o en cualquier punto del flujo.

Balanza diferencial: Para obtener la fuerza de empuje y sustentación sobre la estructura. Se diseñan de acuerdo con la forma del modelo.

Transductor y el equipo electrónico necesario: Para medir las vibraciones inducidas en la estructura y en la interacción entre esta y el flujo.

CAPITULO VII APLICACIONES

1. TRABAJOS QUE PUEDEN REALIZARSE EN UN TÚNEL DE VIENTO

- a) Simulación de vientos naturales.
- b) Estudio de capas límites en general.
- c) Ensayos estáticos de edificios en modelos a escala reducida, con determinación de los coeficientes aerodinámicos de fuerzas y de presiones.
- d) Ensayos en modelos reducidos aeroelásticos para la determinación de deformaciones e interacciones dinámicas.
- e) Estudio de las alteraciones causadas por el viento sobre peatones, vehículos, etc.
- f) Visualización de flujo entorno a edificios.
- g) Estudio de ventilación interna de edificios.
- h) Estudio de dispersión de gases y residuos tóxicos.
- i) Ensayos de modelos de vehículos.
- j) Estudios hidráulicos por vía aerodinámica.
- k) Investigación básica sobre formas geométricas.
- l) Posibilidades de demostración y medición :
 - investigación del desarrollo de la capa límite en una placa plana mediante la medición de la distribución de carga total;
 - estudios de visualización del flujo alrededor de una sección aerodinámica;

- medición de la distribución de la presión alrededor de una sección aerodinámica a diferentes ángulos de ataque;
- medición de la distribución de la presión alrededor de un cilindro;
- medición de sustentación y resistencia en una sección aerodinámica con ranura en el borde de ataque en el borde de escape;
- mediciones de velocidad y distribución de la presión usando un tubo de Pitot estático y sonda de desvío;
- medición de resistencia para una selección de modelos de diferentes formas pero con diámetro ecuatorial común;
- demostración de la vibración aeroelástica de una sección aerodinámica;
- calibración del indicador de velocidad del túnel de viento usando un tubo de Pitot estático y un manómetro inclinado;
- investigación de la estela dejada por un cilindro o una sección aerodinámica usando un rastrillo de medición de estela;

2. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN CURSO

- a) Estudio del viento atmosférico sobre modelos de cubiertas curvas en estructuras bajas en un túnel de viento de capa límite.
- b) Mediciones en situaciones de la acción del viento sobre cubiertas curvas aisladas.
- c) Estudio de la dispersión atmosférica de gases contaminantes en un túnel de viento.
- d) Relevamiento de los parámetros medios y turbulentos del flujo en un canal de aire.
- e) Modelado numérico en 3D de transporte de contaminantes en el subsuelo mediante Boundary Element Dual Reciprocity Method - Multy Domain.
- f) Consideraciones de las incertidumbres en el diseño de estructuras.
- g) Acción del viento sobre cubiertas curvas aisladas (canopy roofs).

CONCLUSIONES

El análisis dimensional es un estudio de las restricciones impuestas sobre la forma de una función algebraica por los requisitos de la homogeneidad dimensional. Después que se ha hecho un análisis semejante, algunas veces se puede imponer restricciones adicionales aplicando cualquier información especial disponible sobre la situación. Una característica importante, común a todas las clases de similitud física, es que para dos sistemas considerados, ciertas relaciones de magnitudes semejantes están fijas. La similitud geométrica requiere una relación fija de longitudes, la similitud cinemática, una relación fija de velocidades, la similitud dinámica, una relación fija de fuerzas, y así en adelante. No obstante, cualesquiera que sean las cantidades implicadas, la relación entre sus magnitudes es adimensional.

Por supuesto, los resultados obtenidos a partir del análisis dimensional dependen de qué cantidades se consideran al principio que afectan al fenómeno que se está estudiando. Si en la lista original de cantidades se deja de incluir una que es en realidad importante, entonces el resultado obtenido del análisis será incorrecto.

El análisis dimensional no proveerá por sí mismo una solución completa a un problema, pero la solución parcial que proporciona, indicará que cualquiera que sea la forma de una relación desconocida que conecta las magnitudes implicadas, ciertas características de esa son ineludibles. Además, la técnica puede guiar al experimentador de modo que pueda obtener la cantidad máxima de información a partir del menor número de experimentos.

Los túneles de viento son un valioso auxiliar para solucionar problemas y permiten el estudio experimental del movimiento de un fluido, reproduciendo a escala

todas sus propiedades físicas y mecánicas para cuantificar el efecto de los diversos factores que intervienen en el fenómeno, tratándolos aisladamente o en conjunto.

La gran variedad de túneles existentes se debe a que los fenómenos estudiados dependen del número de Reynolds, el cual no permite mucha variación en las escalas, de tal manera que se tienen que construir túneles de grandes potencias para lograr grandes presiones; grandes velocidades o grandes dimensiones, a parte de los problemas de funcionamiento que presentan estos grandes túneles.

La simulación por computadora supone ahorrar entre 8 y 10 sesiones de túneles de viento y de agua en cualquier prototipo de avión. Además, se extrapolan datos obtenidos con conocimientos previos del modelo, lo que evita gastar dinero y tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, John D.; Fundamentals of Aerodynamics Singapore Ed. Mc Graw-Hill, 1991, 718 pp.
- DE HOYOS, Dario Fco., Diseño de un túnel de viento de 50 HP Tesis Profesional, "Facultad de Ingeniería" UNAM, 1963, 80 pp.
- Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2003. © 1993-2002 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.
- FOX, R. W. y A. T. Mc Donald; Introducción a la Mecánica de Fluidos 4ª. Edición, México Ed. Mc-Graw Hill, 2000, 916 pp.
- GONZALEZ, Reyna Susana, Manual de redacción e investigación documental 2ª. Edición, México Ed. Trillas, 1982, 181 pp.
- MASSEY, Bernard S., Mecánica de Fluidos México Ed. Continental, 1979, 750 pp.
- MATAIX, C., Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas México Ed. Harla, 1982, 600 pp.
- MOSIÑO, Aleman Pedro A., Diseño de un túnel de viento para calibrar anemómetros Tesis Profesional, "Facultad de Ingeniería" UNAM, 1964, 64 pp.
- MUNSON, Fundamentos de Mecánica de Fluidos 1ª. Edición, México Ed. Limusa, 1999, 864 pp.

- POPE, Allan; Wind Tunnel Testing; Londres Ed. John Wilen & Sons, 1964, 278 pp.
- POTTER, M. C., Mecánica de Fluidos 3ª. Edición, México Thomson Editores, 2002, 769 pp.
- ROBERSON, J. A. Y C.T. CROWE, Mecánica de fluidos 2ª. Edición, México D. F. Ed. Interamericana, 1983, 680 pp.
- SANTAMARIA, Alejandra, Mecánica de Vuelo numero 98-II
- SHAMES, Irving H., La Mecánica de los Fluidos México D. F. Ed. Mc Graw Hill, 1979, 592 pp.
- SMITS, Alexander, Mecánica de Fluidos, una introducción Física México Ed. Alfaomega, 2003, 568 pp.
- SOTELO, A. Gilberto, Proyecto de un nuevo túnel de viento "Facultad de Ingeniería" UNAM, 1968
- STREETER, V. L. y E. B. Wylie, Mecánica de Fluidos México Ed. Mc Graw-Hill, 1999, 775 pp.
- VENNARD, J. K. y R. L. Street, Elementos de Mecánica de Fluidos 2ª. Edición, México Ed. CECSA, 1979, 689 pp.
- WEBBER, N. B., Mecánica de Fluidos para Ingenieros España Ed. URMO, 1969, 370pp.
- WHITE, Frank M., Mecánica de fluidos México Ed. Mc Graw-Hill, 1979,757pp.

- <http://delorenzo.dynu.com/esp/prods/mecanica/aero/#arriba>
- <http://www.fing.edu.uy/imfia/eolodinamica/tunel/general.html>
- <http://www.frh.utn.edu.ar/investigacion/aero/TAMA1/Tama1.htm>
- <http://ing.unne.edu.ar/ie/ie.htm>