



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MEDICIÓN ELECTRÓNICA DE LAS FUERZAS DE
SUSTENTACIÓN Y ARRASTRE EN EL TUNEL
DE VIENTO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

ROBERTO FLAVIO ARGÜELLES ARREDONDO



DIRECTOR DE TESIS: ING. ARMANDO MALDONADO S.

MEXICO, D. F.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

CONTENIDO

i. Introducción.	1
I. Túneles de viento.	2
I.1. Partes principales de los túneles de viento.	5
I.2. Parámetros de prueba importantes.	5
I.3. Tipos de túneles de viento.	6
I.4. Ventajas de los túneles abiertos.	8
I.5. Desventajas de los túneles abiertos.	8
I.6. Ventajas de los túneles de circuito cerrado.	9
I.7. Desventajas de los túneles de circuito cerrado.	9
I.8. Sección de prueba abierta o cerrada.	9
I.9. Túneles con gran # de Reynolds.	10
I.10. Túneles de vuelo libre.	10
I.11. Túneles de desplome.	11
I.12. Túneles de estabilidad.	11
I.13. Túneles de propulsión.	11
I.14. Túneles refrigerados.	12
I.15. Túneles de baja turbulencia.	12
I.16. Túneles bidimensionales.	12
I.17. Túneles de humo.	13
I.18. Túneles meteorológicos y de medio ambiente.	13
I.19. Túneles automovilísticos.	13
I.20. Túneles pequeños.	13
I.21. Tipos de pruebas que se pueden realizar en los túneles de viento.	14
II. Medidores de deformación (Strain Gages).	15
II.1. Introducción.	15
II.1.1. Métodos para sensar la deformación.	17
II.2. Características.	18
II.3. Tipos de medidores de deformación.	20
II.3.1. Configuraciones de medidores de deformación.	22

II.3.2. Valores estandar de medidores de deformación.	24
II.4. Mediciones con medidores de deformación.	24
II.4.1. Tamaño de las mediciones.	25
II.4.2. Lugar de aplicación del medidor de deformación.	25
II.4.3. Equipo periférico al medidor de deformación.	26
II.4.4. Efecto de histéresis.	28
II.5. Montaje del medidor de deformación.	29
II.5.1. Pegamento.	30
II.6. Respuesta.	31
II.6.1. Tiempo de respuesta.	31
II.6.2. Salida del puente de Wheatstone.	31
II.7. Sensibilidad con la temperatura.	32
II.7.1. Medidor de deformación de compensación de temperatura.	33
II.8. Limitaciones.	34
II.9. Tiempo de operación.	34
II.10. Fabricación de los medidores de deformación.	35
II.11. Aplicaciones típicas.	36
II.12. ¿Cómo seleccionar un sensor?.	37
III. Análisis del dispositivo.	38
III.1. Introducción.	38
III.1.1. Necesidad de...	38
III.1.2. Antecedentes.	39
III.2. Diseño y construcción del dispositivo.	41
III.2.1. Diseño	41
III.2.2. Fabricación.	43
III.2.2.1. Parte mecánica	43
III.2.2.2. Parte eléctrica.	52
III.3. Ensamble.	54
III.4. Calibración.	55
III.5. Funcionamiento.	61
III.6. Operación.	63

IV. Medición de distintos perfiles.	64
IV.1. Introducción.	64
IV.2. Perfil NACA 0012.	65
IV.3. Perfil NACA 2421.	66
V. Análisis de resultados.	70
VI. Conclusiones y recomendaciones.	73
Bibliografía.	75

"MEDICIÓN ELECTRÓNICA DE LAS FUERZAS DE SUSTENTACIÓN Y ARRASTRE EN EL TÚNEL DE VIENTO"

i. INTRODUCCIÓN

En la Mecánica de fluidos, así como en cualquier otra rama de la Ingeniería, la medición de los fenómenos de la naturaleza ayuda a cuantificar la intensidad, frecuencia de ocurrencia, localización, etc. de éstos y comprender mejor su comportamiento para utilizarlo en beneficio nuestro y de la comunidad; además permite, hasta cierto límite, predecir el comportamiento del fenómeno. En Mecánica de Fluidos los fenómenos que se estudian son los producidos por los fluidos, una explicación corta pero exacta de un fluido es: "...es aquel material al cual si se le aplica un esfuerzo cortante, por pequeño que éste sea, resultará en el movimiento de éste. ". El fluido se moverá y deformará continuamente tanto como el esfuerzo cortante sea aplicado

En los capítulos que siguen se estudiarán los esfuerzos ejercidos por el fluido aire en diversos cuerpos puestos dentro del túnel de viento existente en el Departamento de Termoenergía y Mejoramiento ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

En el capítulo I se analizarán todos los aspectos relacionados con los túneles de viento: sus características, tipos, usos y su construcción. Los medidores de deformación se estudiarán en el capítulo II para entender cómo funcionan y cómo se pueden utilizar.

En el capítulo III se explica la construcción del dispositivo para medir las fuerzas basado en medidores de deformación y su utilización en el túnel de viento. En el capítulo IV se medirán las fuerzas que se ejercen en distintos cuerpos para calcular sus coeficientes de arrastre y sustentación y ser comparados con los de la literatura. El análisis de los resultados del capítulo IV serán tratados en el capítulo V y las conclusiones y recomendaciones serán tratadas en el último capítulo.

CAPITULO I

"TÚNELES DE VIENTO"

Los primeros esfuerzos de los humanos para diseñar máquinas voladoras más pesadas que el aire o sea aeroplanos, estuvieron basados en la observación de las aves al vuelo. En el siglo XV Leonardo Da Vinci usó esta propuesta entre otras y dejó más de 500 bocetos y 35000 palabras escritas tratando el problema del vuelo. En los siglos XVIII y XIX se realizó muy poca investigación de lo que ahora llamamos aerodinámica. Esto llevó hacia el concepto de construir instrumentos para medir fuerzas aerodinámicas y momentos.

Los primeros experimentadores reconocieron que las fuerzas aerodinámicas estaban en función de la velocidad relativa entre el aire y el modelo en estudio. Entonces se podría mover el modelo a través del aire o dejar que el aire pasara por un modelo estacionario o fijo. Inicialmente esto condujo al uso de vientos naturales como una fuente de aire en movimiento pero su comportamiento aleatorio rápidamente condujo a la construcción de dispositivos mecánicos para mover a través del modelo el aire. El método para lograr esto fue montar el modelo en un brazo giratorio que podría estar movido por pesas y poleas.

En el siglo XVIII Robins, uno de los primeros aerodinamicistas experimentales, usó un brazo giratorio para estudiar varios tipos de cuerpos. El llegó a la conclusión que las relaciones entre la forma del cuerpo, orientación del viento y las fuerzas aerodinámicas eran mucho más complejas de lo indicado por la teoría.

A finales del siglo XVIII y principios del XIX Cayley comienza una investigación sistemática de la sustentación y el arrastre de perfiles aerodinámicos con un brazo giratorio. Sus estudios dieron por resultado un pequeño planeador no tripulado que se cree fue la primera máquina voladora más pesada que el aire.

Cerca del final del siglo XIX el mayor defecto de un brazo giratorio apareció. El defecto era que el cuerpo fue forzado a volar en su propia estela turbulenta (aún es un problema en los rotores de los helicópteros). Esto condujo hacia el túnel de viento donde el modelo está fijo y el aire es el que se mueve a través del modelo.

Los hermanos Wright usaron el aire natural y un papalote biplano en 1899 para resolver el problema del control de balanceo (alabeando las alas). De estos resultados construyeron el planeador #1 en 1900. Este planeador probó que su control de balanceo y cabeceo trabajaban, pero la sustentación bajó y el arrastre subió más de lo esperado (esto es aún un problema). Los Wright siguieron usando el aire natural y una balanza para medir sustentación y comparar perfiles aerodinámicos curvados y no curvados. De estos resultados empezaron a sospechar que los datos de diseño aerodinámico publicados eran erróneos.

El planeador #2 usó estos resultados en 1901, pero el momento de cabeceo, debido a una curvatura muy grande del perfil hizo al planeador difícil de controlar. Esto los forzó a reducir la curvatura. Desde ese momento los Wright se convencieron de que los datos aerodinámicos disponibles eran erróneos y decidieron confiar en sus propios datos.

Los hermanos Wright usaron entonces una bicicleta para proporcionar aire y comparar 2 modelos de prueba montados sobre una rueda horizontal adelante de la bicicleta. Los toscos datos de estas pruebas reforzaron su opinión para rechazar todos los datos publicados

Así los Wright construyeron un túnel de viento, primero un túnel simple y luego uno más grande y sofisticado de 16 pulgadas cuadradas de área en la sección de prueba y obtener datos para su planeador #3 en 1902, el cual fue un éxito además de añadirle un timón de dirección al modelo para contrarrestar el guiño adverso ocasionado por controlar el cabeceo del ala alabeada.

El famoso vuelo del planeador #3 fue cuidadosamente duplicado en 1903 con la adición de un motor y 2 hélices de rotación opuesta.

El uso de panales de abeja reduce pero no elimina los remolinos del ventilador y la turbulencia.

Aunque Horacio Frederick Phillips construyó el primer túnel de viento en 1884 y midió sustentación y arrastre de aspas curvas, fueron los hermanos Wright quienes demostraron el valor de los túneles de viento en diseño aerodinámico en 1903, pero los europeos capitalizaron este conocimiento al usar cerca de una docena de grandes túneles de viento construidos con fondos del gobierno en laboratorios aeronáuticos para lograr liderazgo técnico dentro de la aviación entre 1903 y 1914.

La construcción de túneles de viento por los europeos ha creado 2 tipos principales de túneles, siendo conocidos por sus nombres europeos. El túnel de circuito abierto ó túnel de no retorno, donde el cuarto que lo rodea actúa como un retorno de aire, es conocido como tipo Eiffel ó tipo NPL (National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, Inglaterra), nombrado así por el famoso ingeniero francés y el laboratorio Británico. El túnel con un retorno cerrado ó circuito continuo usa aspas de hélice en las esquinas para desviar el aire es conocido como el tipo Prandtl ó tipo Gottingen, nombrado así en honor del famoso aerodinamista alemán y la universidad en la cual fue construido.

Para poder obtener información de las pruebas aerodinámicas se utilizan las siguientes técnicas :

- *pruebas de vuelo*
- *pruebas de caída o descenso*
- *acarreo en cohetes*
- *túneles de agua*
- *brazos giratorios*
- *disparos de cañón*
- *vuelos de cohete*
- *vuelos de modelos a escala*
- *recorridos de balas o proyectiles y*
- *túneles de viento subsónicos, cercanos y a la velocidad del sonido (transónicos) así como supersónicos e hipersónicos.*

El uso de uno u otro de los aparatos descritos tiene sus ventajas y desventajas y dependen de la aplicación.

Porque hacen posible usar modelos y porque siempre están disponibles, los túneles de viento son un medio económico, rápido y exacto para la investigación aerodinámica. Su uso ahorra tiempo dinero y vidas.

I.1. PARTES PRINCIPALES DE LOS TÚNELES DE VIENTO

Aunque los túneles de viento han sido construidos en muchas configuraciones diferentes, tienen 4 partes básicas, las cuales son:

1. Un ducto contorneado para controlar el paso del fluido de trabajo a través de la sección de prueba donde el modelo es montado.
2. Un sistema impulsor para mover el fluido de trabajo a través del ducto
3. Un modelo, objeto de la prueba que está a escala natural o más comúnmente un modelo a escala reducida.
4. Instrumentación, que puede ser verdaderamente simple, tal como una balanza de resorte para medir fuerza ó extremadamente compleja, tal como modernos sistemas de balance alimentando en su salida a computadoras.

I.2. PARÁMETROS DE PRUEBA IMPORTANTES

de Reynolds = (fuerzas de inercia)/(fuerzas viscosas) = $(\rho V)L/\mu$

de Mach = (fuerzas de inercia)/(fuerzas elásticas) = V/a

de Froude = (fuerzas de inercia)/(fuerzas de gravedad) = (V/gL)

La mayor parte de las pruebas en los túneles de viento de baja velocidad se hacen teniendo en cuenta el # de Reynolds. Para que las condiciones en el túnel de viento sean las mismas que en el modelo a escala natural los # de Reynolds deben ser idénticos, así como deben ser idénticos los #s de Mach. Además, para un modelo en vuelo libre (un modelo dinámico o en desplome) el # de Froude debe ser el mismo.

Y como en el túnel de viento la mayor parte de las pruebas se hacen con el modelo fijo no se necesita encontrar el # de Froude. El # de Mach se aplica a los vehículos voladores que se encuentran viajando a la velocidad del sonido y donde los efectos del # de Reynolds no son críticos, así como en la región de baja velocidad no predominan los efectos del # de Mach. Pero en cualquier prueba una cuidadosa evaluación de los efectos del # de Mach y del # de Reynolds deben ser hechos para asegurar que los resultados sean válidos.

1.3. TIPOS DE TÚNELES DE VIENTO

Existen 2 tipos básicos de túneles de viento y 2 configuraciones básicas de secciones de prueba.

El primer tipo básico de túnel es el túnel de circuito abierto (fig. 1.1).

En este tipo de túnel el aire sigue un camino recto de la entrada a través de un estrechamiento hacia la sección de prueba, seguida por un difusor, una sección de ventilación y un escape de aire. El túnel puede no tener límites sólidos en la sección de prueba o puede tenerlos.

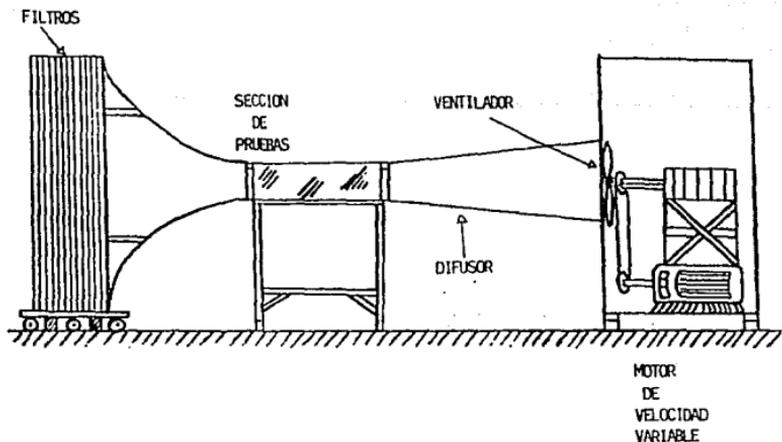


FIGURA 1.1. TÚNEL DE CIRCUITO ABIERTO

El segundo tipo es el de circuito cerrado que tiene un camino continuo para el aire. La gran mayoría de los túneles de circuito cerrado tienen un solo regreso (fig. 1.2), aunque han sido construidos túneles con retornos dobles y en anillo. Asimismo, el túnel de circuito cerrado puede tener una sección de prueba abierta o cerrada, según se necesite.

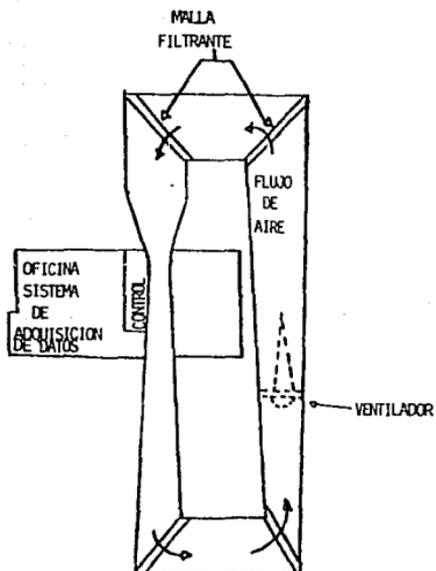


FIGURA 1.2. TÚNEL DE CIRCUITO CERRADO

Como en cualquier diseño en Ingeniería, existen ventajas y desventajas con los túneles de tipo circuito abierto y cerrado. En general, el tipo de túnel esta determinado por la cantidad de dinero disponible y el propósito de uso.

I.4. VENTAJAS DE LOS TÚNELES ABIERTOS

1. Costo de construcción menor
2. Si se desea echar a andar motores de combustión interna o tener visualización con humo no hay problema para limpiar el aire, si la boca de entrada y el escape están abiertas a la atmósfera.

I.5. DESVENTAJAS DE LOS TÚNELES ABIERTOS

1. Para los túneles que están localizados en un cuarto cerrado debe cuidarse la relación existente entre el tamaño del túnel y el cuarto donde se encuentra para limpiar el aire en la entrada del túnel, porque en la sección de prueba el flujo sea de muy buena calidad.
2. Los túneles grandes necesitan mucha mas energía para mover el flujo y cuando se utilizan muchas veces ésta energía puede ser de un costo muy grande.
3. Los túneles de viento hacen mucho ruido y cuando son muy grandes pueden causar problemas de vibración y limitar el tiempo de operación.

Por su bajo costo inicial, un túnel de circuito abierto es ideal para escuelas y universidades donde se necesita un túnel para trabajo de clase e investigación y no se use mucho.

I.6. VENTAJAS DE LOS TÚNELES DE CIRCUITO CERRADO

1. A través del uso de guías desviadoras en las esquinas y filtros la calidad del flujo puede ser controlada.
2. Requieren menos energía que los túneles de circuito abierto del mismo tamaño y puede ser importante si se utiliza frecuentemente (2 ó 3 pruebas diferentes, 5 ó 6 días a la semana).
3. Menos ruido cuando esta en operación.

I.7. DESVENTAJAS DE LOS TÚNELES DE CIRCUITO CERRADO

1. Al principio el costo puede ser muy alto porque se necesitan conductos de retorno y guías en las esquinas.
2. Debe tener intercambiador de aire si se hacen pruebas con humo y algún método de enfriamiento del aire en temporada de calor.

I.8. SECCIÓN DE PRUEBA ABIERTA O CERRADA

Cuando se tiene un túnel de circuito abierto y una sección de prueba abierta se debe también tener un recinto alrededor de la sección de prueba para evitar que el aire sea extraído desde la sección de prueba en lugar de la boca de entrada.

Para túneles de circuito cerrado de gran tamaño con una balanza externa, la sección de prueba abierta servirá para tener una frontera sólida, puesto que la balanza debe estar protegida del viento.

En las secciones de prueba cerradas es más fácil montar un modelo porque entre más grande es el túnel más difícil es hacer cambios, y se les prefiere.

I.9. TÚNELES CON GRAN # DE REYNOLDS

Existen métodos para elevar el # de Reynolds en un túnel de viento:

1. El método más antiguo es presurizar el túnel de acuerdo a la ecuación de estado para un gas perfecto y la ecuación del # de Reynolds:

$$\text{Ecuación de estado } P = rRT$$

$$\# \text{ de Reynolds} = (r/\mu)VL$$

Y de acuerdo a las ecuaciones anteriores, si se incrementa la presión la densidad aumentará y por consiguiente el No de Reynolds.

Se debe tener en mente lo siguiente :

- cuesta muy cara una armadura que soporte tan altas presiones.
- se necesitan compresores y son muy caros, así mismo la compresión debe ser constante para mantener la presión
- se tiene el inconveniente que los modelos están expuestos a grandes cargas.

- si se necesita tener acceso al modelo se debe despresurizar el túnel.

2. También se puede cambiar el fluido de trabajo, el uso de freón 12 puede incrementar el # de Mach y el # de Reynolds, además se tendrán muchos de los problemas de los túneles presurizados.

3. Una tercera manera es usar un túnel criogénico; en este tipo de túnel el fluido de trabajo es el nitrógeno y se inyecta aguas arriba del ventilador para enfriarlo. Por esta técnica es posible operar sobre un rango de presiones dinámicas y #s de Reynolds a una temperatura constante hasta un límite de estancamiento de la presión del túnel, similar a cualquier presión del túnel, ó el túnel puede estar funcionando a presión constante dinámica y por cambio de temperatura, el # de Reynolds puede cambiar. El costo para construirlo y operarlo es muy alto pero da una idea de lo que se puede lograr con un túnel de viento.

I.10. TÚNELES DE VUELO LIBRE

Se les conoce a estos túneles de vuelo libre porque los modelos se dejan caer en un túnel vertical bajo la influencia de la gravedad, y algunas veces están inclinados para encontrar el ángulo de planeo del modelo.

I.11. TÚNELES DE DESPLOME

La tendencia de algunos aviones por desplomarse después de alcanzar la velocidad de entrada en pérdida y la recuperación del desplome han sido uno de los problemas permanentes de los diseñadores de aviones. La recuperación del desplome es estudiada en un túnel de desplome. Este es un túnel de viento vertical con el aire inducido hacia arriba por una hélice cercana a la cima del túnel. El túnel de desplome utiliza un retorno anular con guías para que de vuelta el aire. El modelo dinámicamente similar al real es insertado dentro del túnel por un operador en posición de desplome. La velocidad del viento en el túnel es ajustada para mantener el modelo a una altura constante, y el movimiento del modelo es grabado en película y por TV para su análisis.

I.12. TÚNELES DE ESTABILIDAD

Estos túneles tienen 2 secciones de prueba intercambiables, una de las secciones tiene instaladas aspas roatorias que crean un remolino en la corriente de aire. La segunda sección de prueba está curvada para simular un giro de vuelo. También se pueden obtener resultados similares usando técnicas de oscilación del modelo en túneles de viento convencionales o pruebas de vuelo libre.

I.13. TÚNELES DE PROPULSIÓN

Estos túneles son usados para simular el comportamiento de los motores de los aviones, se debe tener en cuenta la variación de la presión atmosférica, la velocidad de vuelo y la variación de la temperatura, como se trabaja con motores hay que eliminar los gases producidos por la combustión y para esto se recomienda usar un túnel de circuito abierto. Para obtener una baja densidad se usan bombas y un sistema de refrigeración para simular la baja temperatura de las alturas.

1.14. TÚNELES REFRIGERADOS

Este tipo de túnel debe poseer un sistema refrigerante de tal magnitud que permite simular las bajísimas temperaturas que se producen en un avión en vuelo, también tendrá vaporizadores aguas arriba de la sección de prueba para producir gotitas congelantes.

La armadura tiene que ser lo suficientemente aislante para evitar el equilibrio con el medio ambiente. La formación de hielo en los aviones y helicópteros (que alcanza temperaturas cercanas a los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), es aún un problema.

1.15. TÚNELES DE BAJA TURBULENCIA

Los túneles de baja turbulencia tienen un amplio ángulo difusor justo a la cabeza de una cámara de sedimentación de la sección de prueba, algunos del orden de 17 a 1. La cámara de sedimentación tiene paneles de abeja y rejas para disminuir la turbulencia y su tamaño permite para un gran estrechamiento reducir la turbulencia un poco más allá. Para disminuir aún más la turbulencia estos túneles utilizan guías en las esquinas con curvaturas de 180° en vez de usar las de 90° .

1.16. TÚNELES BIDIMENSIONALES

Estos túneles tienen muy altas y delgadas secciones de prueba con rangos de altura/ancho de 2 ó más. son del tipo de baja turbulencia y pueden ser presurizados para incrementar el # de Reynolds. Pueden tener las 2 configuraciones, ya sea en circuito cerrado o en abierto. Se usan para hacer pruebas en perfiles aerodinámicos principalmente

I.17. TÚNELES DE HUMO

Los túneles de humo se utilizan principalmente para visualización de flujos y pueden tener las configuraciones bidimensional y tridimensional, la mayor parte de ellos son del tipo de circuito cerrado y pueden caracterizarse principalmente por que se toman fotografías como principal medio de adquisición de datos. Para obtener el humo se utilizan aceites ligeros vaporizados.

I.18. TUNELES METEOROLÓGICOS Y DE MEDIO AMBIENTE

Estos túneles están diseñados específicamente para simular las capas límite naturales de la tierra, las cuales pueden ser tan grandes como 305 a 610 mts. Estos túneles son usados para determinar cargas del viento en edificios y sus áreas circunvecinas, contaminación del aire y polución, erosión del suelo, ventiscas, etc.

I.19. TÚNELES AUTOMOVILÍSTICOS

Las pruebas de parámetros que afectan el rendimiento y la estabilidad de los automóviles son hechas con modelos a escala ó a escala natural en grandes túneles de viento

I.20. TÚNELES PEQUEÑOS

Aquí se han mencionado casi todos los tipos de túneles pero existen algunos otros como por ejemplo los pequeños. Los túneles pequeños tienen la peculiaridad de producir bajos #s de Reynolds. Se debe mencionar que los túneles pequeños pueden hacer prácticamente todo lo que los grandes pero tienen la desventaja de tener que usar solo pequeños modelos aunque son considerablemente (dentro de lo que cabe) más baratos lo que los hace ser perfectamente adecuados para el trabajo en las escuelas de ingeniería.

I.21. TIPOS DE PRUEBAS QUE SE PUEDEN REALIZAR EN LOS TÚNELES DE VIENTO

Existen muchas áreas de investigación y desarrollo en las cuales se pueden usar los túneles de viento que no sean solo aeronáuticas, aquí se presentan algunos ejemplos

- *Investigaciones sobre erosión del suelo.*
- *Comportamiento de las antenas y los radares*
- *Estudios meteorológicos (simulación atmosférica).*
- *Estudios de los problemas de arrastre en los esquís y las bicicletas*
- *Estudios para contrarrestar la contaminación del aire.*
- *Simulación de las fuerzas del viento sobre edificios, puentes y construcciones.*
- *Pruebas en todo tipo de automotores.*
- *Estudios sobre la transpiración de las plantas.*
- *Prácticamente cualquier problema relacionado con el viento.*

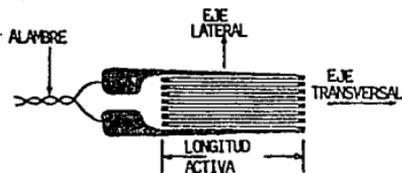
CAPITULO II

MEDIDORES DE DEFORMACIÓN (STRAIN GAGES)

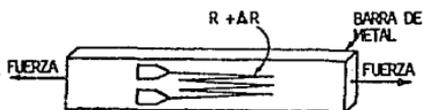
II.1. INTRODUCCIÓN

Un medidor de deformación es un alambre conductor cuya resistencia cambia por una pequeña cantidad cuando se alarga o acorta. El cambio en longitud es pequeño, unas pocas millonésimas de pulgada. El sensor esta montado sobre una estructura de tal manera que cuando exista una deformación también exista en el sensor una deformación de la misma magnitud.

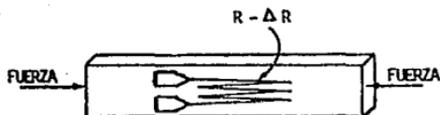
En la figura II.1(a) se puede observar un sensor del tipo hojuela. A lo largo del eje transversal donde se mide la deformación y así es como se monta en la estructura para que se pueda medir. En las figuras II.1(b) y (c) se puede observar como si se alarga el conductor del sensor se incrementa su resistencia y si se comprime se reduce la resistencia.



a) SENSOR DEL TIPO HOJUELA



b) LA RESISTENCIA DEL SENSOR AUMENTA CUANDO SE ALARGA LA ESTRUCTURA



c) LA RESISTENCIA DEL SENSOR DISMINUYE CUANDO SE ACORTA LA ESTRUCTURA

FIGURA II.1. SENSOR DE DEFORMACIÓN USADO PARA MEDIR EL CAMBIO DE LONGITUD EN UNA ESTRUCTURA.

Aunque la deformación ha sido medida por sensores capacitivos y otros, frecuentemente es determinada por medios foto-ópticos, el dispositivo más usado para tales mediciones es el sensor de deformación ó medidor de deformación. El cambio en la resistencia es convertido a un voltaje conectándolo a un puente de Wheatstone. El puente de Wheatstone es excitado con un voltaje y la salida se mide de acuerdo a el esfuerzo a que es sometido la rama activa del puente que en este caso es el sensor de deformación.

II.1.1. MÉTODOS PARA SENSAR LA DEFORMACIÓN

En esta parte se describen brevemente algunos métodos para sensar la deformación

1. Método óptico

El método óptico consiste en que un modelo transparente (en su mayoría cristales orgánicos especiales) sometido a tensión e iluminado con luz polarizada, proyecta sobre una pantalla un sistema de franjas cuya forma y posición se determina por el estado de tensión del modelo.

2. Capa frágil

Este método consiste en aplicar una fina capa de barniz, que al secarse forma una película fina fuertemente unida con el metal. Cuando el objeto de ensayo está en la zona de tensiones elevadas, en el recubrimiento de barniz aparece una red de grietas pequeñas revelando la deformación fundamental del metal

3. Método de los rayos X

Esta técnica esta basada en la medición de la distancia entre los átomos de la red cristalina del metal. Por lo general esta distancia puede variar por 2 razones: por la acción de la temperatura y por la acción de fuerzas.

Comparando la distancia entre el modelo sin cargar y con carga se obtiene la deformación unitaria y después de introducir la corrección correspondiente a la temperatura, se determina la tensión.

Este método permite determinar las tensiones en el metal sin referencia alguna, esto es que las compresiones no pueden ser captadas por otros métodos.

4. Método de Moiré

El método de las franjas de Moiré consiste en la aplicación de una rejilla de líneas uniformemente espaciadas y paralelas sobre el objeto que se ensaya. Cuando el objeto de ensayo es sometido a un sistema de fuerzas éste tenderá a deformarse y como consecuencia la rejilla también se deformará.

5. Medidores de deformación resistivos.

Si se considera un conductor con un área en su sección transversal A y longitud L , hecho de un material que tiene una resistividad r . La resistencia R de tal conductor esta dada por:

$$R = r(L/A) \quad (II.1)$$

Cambiando las dimensiones del conductor de alguna manera, es decir su área transversal, también cambiará su resistencia al paso de la corriente por la propiedad de los materiales llamada piezoresistencia, que dice que si se deforma mecánicamente el material se tendrá un cambio en su resistividad.

II.2. CARACTERÍSTICAS

Para caracterizar un sensor o medidor de deformación los fabricantes dan algunas de las especificaciones que se mencionan a continuación :

- **Dimensiones.** Entre los datos de las dimensiones no solo se mencionan su longitud y su ancho totales sino también se incluyen la longitud y el ancho de sus terminales así como un dibujo en tamaño real del sensor en caso que sea conectado o encapsulado.
- **Materiales.** En los empaques se escriben los datos de los materiales con que fueron construidos así como el objetivo para el cual se diseñaron.
- **Temperatura.** Cuando el sensor tiene compensación de temperatura, el coeficiente de expansión térmica debe ser mostrado. Un rango de temperatura es siempre especificado para los sensores de roseta y los efectos térmicos en

el factor de gage, así como en la resistencia del sensor. Los límites de temperatura máxima para una exposición corta pueden ser incluidos. Los efectos de la expansión por temperatura y una expansión térmica diferencial entre el sensor y la estructura de medición con frecuencia en los manuales es referida como "esfuerzo aparente" ("apparent strain") y debe ser conocido aún para sensores con autocompensación de temperatura y se calcula como sigue:

Esfuerzo aparente = $\text{abs}(\text{esfuerzo real} - \text{esfuerzo medido})$.

Esfuerzo real = Es la deformación de la superficie en estudio debida a cargas aplicadas o a cambios en la temperatura.

Esfuerzo medido = Es la señal de salida de un sensor instalado y que esta indicado en el dispositivo de salida.

- **Resistencia.** La resistencia del sensor está mostrada en Ohms con su tolerancia, y si el sensor se tiene que soldar la resistencia de aislamiento debe ser mostrada.

- **Corriente.** La máxima corriente de excitación permitida para un sensor debe ser conocida para una aplicación específica.

- **Factor de gage.** El factor de gage (factor del sensor de deformación) esta siempre mostrado con su tolerancia. El factor de gage es la razón del cambio en % en la resistencia de un sensor a su cambio en % de la longitud. Estos cambios porcentuales también se expresan como decimales. Si la razón DR/R se divide entre el factor de gage, el resultado es la razón del cambio en la longitud del sensor DL respecto a su longitud original L . La estructura donde esta montado el sensor tiene la misma DL/L .

- **Esfuerzo.** El rango de esfuerzo debe siempre estar mostrado (en %, en microesfuerzos o microdeformaciones, o en otras unidades tales como $\mu\text{in/in}$). También deben mostrarse las condiciones límites de trabajo tales como el límite de esfuerzo.

- **Sensibilidad.** La sensibilidad transversal pueden mostrarse en los sensores que lo ameriten.

- **Tiempo de vida.** Frecuentemente se muestra el ciclo de vida del sensor como tiempo de fatiga.

II.3 TIPOS DE MEDIDORES DE DEFORMACIÓN

Existen 2 configuraciones básicas de medidores de deformación y son del tipo hojuela ó lámina y tipo alambre. El tipo lámina esta construido por una lamina de metal de aleación y el tipo alambre esta constituido por alambres alineados en un eje, aunque pueden ser biaxiales también.

El tipo más común de medidores de deformación puede ser construido de las siguientes aleaciones : (55% cobre, 45% níquel) ó isoelástico (36% níquel, 8% cromo, 4% manganeso, silicio y molibdeno, hierro). La aleación de cobre y níquel da un factor de gage alrededor de 2 y el isoelástico cercano a 3.5. Si se utiliza medidores de deformación del tipo semiconductor en vez de los metálicos se puede ver que su factor de gage es casi 130, esto debido a que el cambio en la resistencia es por efectos piezoresistivos (r) más que por cambios en sus dimensiones.

Los 3 tipos básicos se pueden ver en la figura II.2

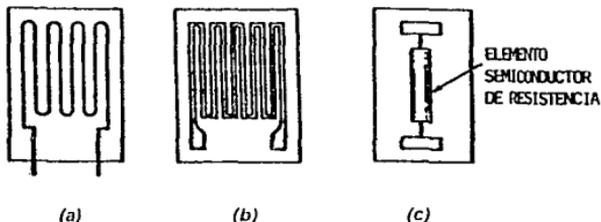


FIGURA II.2 TRES TIPOS DE MEDIDORES DE DEFORMACIÓN CON RESISTENCIA.

a) MEDIDOR DE ALAMBRE; b) MEDIDOR DE HOJUELAS; c) MEDIDOR SEMICONDUCTOR.

Los medidores de deformación se utilizan con 2 principios básicos: conectados y aislados. En el medidor aislado mostrado en la figura (II.3), los cables resistivos son estirados entre 2 estructuras, las cuales tienen un movimiento relativo entre sí, movidos por 2 platos flexibles. Puesto que los alambres se doblarían si las fuerzas de compresión fueran aplicadas se utiliza

un estiramiento mayor que cualquier carga externa planeada. Así moviendo a la derecha se estiran los alambres 1 y 3, y reduce la tensión en los alambres 2 y 4. Un movimiento a la izquierda hace lo contrario, y así, movimientos en ambas direcciones pueden ser medidas en tanto que el estiramiento anterior a las cargas no sea superado. Los alambres resistivos se conectan generalmente en un circuito puente (mostrado en la figura (II.3)). Con el estiramiento presente pero sin carga aplicada, el puente esta balanceado si :

$$R1/R4 = R2/R3$$

En el puente se colocan resistencias variables para lograr que la relación anterior se cumpla.

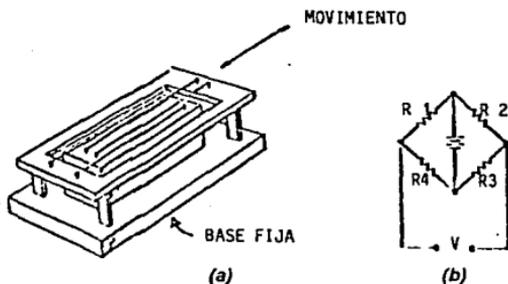


FIGURA II.3. a) MEDIDOR AISLADO; b) CIRCUITO PUENTE.

Y si se coloca una carga en el puente, éste se desbalanceará y se obtendrá un voltaje en la salida que es proporcional a la variación. Las variaciones que estos sensores miden son muy pequeñas, del orden de 0.00015in ($38.1\mu\text{m}$).

Los medidores aislados son usados principalmente como elementos transductores de fuerza y presión y acelerómetros, en vez de usarse directamente como medidores de desplazamiento. Aquí los cables de deformación se pueden usar como resortes en la transducción de fuerza a deflexión, además de ser un sensor de desplazamiento. Los cables soportan

una fuerza de alrededor de 4.2grs., para la deflexión máxima de 38.1(μm)(0.0015in).

La resolución de estos dispositivos es muy pequeña ya que la variación de la resistencia es muy suave.

Los medidores de deformación metálicos conectados usan elementos de alambre en una malla plana o aplanada de construcción en espiral o en una hoja delgada de metal impreso y grabado para darle una imitación de tipo malla, fig II.4. Hay strain gages de muy diversos tamaños desde cerca de 15.24 cm (6 in) de longitud hasta aprox. 0.4 mm(1/64 in). Los strain gages deben estar pegados a la superficie cuya deformación va a ser medida con un pegamento adecuado a las condiciones ambientales. Una vez pegados los medidores no pueden ser quitados o reutilizados.



FIGURA II.4. MEDIDORES DE DEFORMACIÓN TIPO MALLA

II.3.1. CONFIGURACIONES DE MEDIDORES DE DEFORMACIÓN

Los medidores de deformación conectados se fabrican en varias configuraciones tales como :

a) sencillos. Son aquellos que "sienten" la deformación o el esfuerzo en un solo sentido, es decir sobre un solo eje, también se les llama uniaxiales, se muestra algunos en la figura II.5.



FIGURA II.5. MEDIDOR DE DEFORMACIÓN UNIAxIAL

b) Rosetas. El tipo roseta consta de varias configuraciones diferentes ya que tienen 2, 3, 4 y hasta mas ejes dependiendo de la aplicación. En la figura II.6 se muestran algunos de éstos.

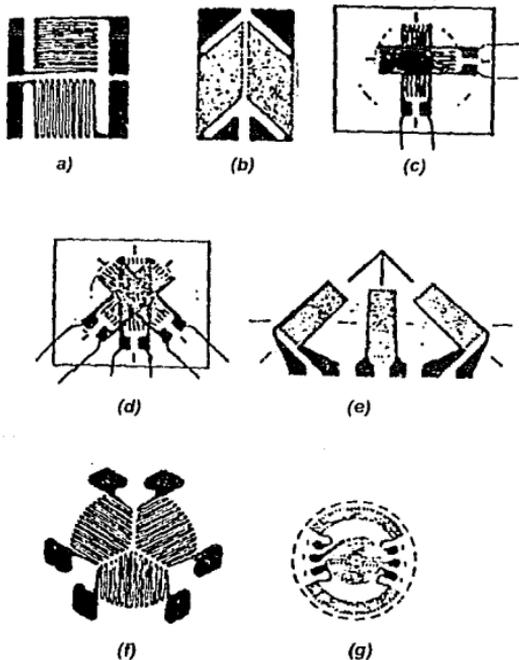


FIGURA II.6. Ejemplos de medidores de deformación tipo roseta a) de 2 elementos a 90° del tipo hojuela sencillos. b) de 2 elementos a 90° inclinado del tipo hojuela. c) de 2 elementos a 90° encimados. d) de 3 elementos a 45° rectangular encimado. e) de 3 elementos a 45° sencillos. f) de 3 elementos a 60° sencillos. g) de 4 elementos en configuración de puente de diafragma.

II.3.2. VALORES ESTANDAR DE MEDIDORES DE DEFORMACIÓN

La resistencia de medidores de deformación individuales esta dentro del rango de 40 a 2000 Ohms, con 120, 350 y 1000 Ohms como valores estandard más comunes.

II.4. MEDICIONES CON MEDIDORES DE DEFORMACIÓN

Para medir esfuerzos con medidores de deformación se debe conocer su resistencia y su factor de gage. Si se quiere medir la resistencia de un medidor de deformación se puede usar un ohmetro. Sin embargo el factor de gage para ser encontrado tiene que ser con el medidor pegado a un cuerpo y, aplicando cargas conocidas o deflexiones, para poder medir su resistencia en cada medición. El inconveniente, y vaya que si es un inconveniente, es que una vez pegado el medidor no se puede volver a usar en algún otro elemento ya que no serviría. Los fabricantes miden el factor de gage, tomando muestras de los medidores de deformación fabricados y calibrados para llevar un exhaustivo y completo control de la producción para que los factores de gage no se desvien más allá de un cierto porcentaje. Así los medidores de deformación traen en su envoltura una especificación de resistencia y factor de gage mas/menos una incertidumbre indicada en %.

Se debe mencionar que los medidores de deformación no miden la deformación sino que son sensibles a ella, de este modo se debe convertir el cambio de resistencia en una señal de voltaje o corriente. Los medidores de deformación solo cambian su resistencia en muy poca cantidad, en consecuencia solo se obtiene un pequeño cambio en el voltaje. Si se pasa una corriente de 4mA a través de un sensor de deformación de 120Ohms solo se tiene a la salida una señal de 0.48 V. Al cambiar la resistencia en 1mOhm la señal de voltaje en la salida cambiará en 4 μ V. Debido a la dificultad de detectar y mostrar 4 μ V se necesita amplificar por lo menos en un factor de 1000 y así se tendrán 4mV, pero al amplificar éste cambio se amplifica también toda la señal y habría una diferencia muy grande entre ellas ya que una sería de 480V contra 4mV y se tiene así el mismo problema inicial. entonces se hace indispensable un circuito que solo amplifique la diferencia en voltaje a través del sensor de deformación causado por un cambio de resistencia. La solución

se encuentra en el circuito puente que se examinará en los apartados siguientes.

II.4.1. TAMAÑO DE LAS MEDICIONES

Como se indico anteriormente los medidores de deformación las variaciones que es posible medir con ellos son muy pequeñas, del orden de $38.1 \mu\text{m}$ (0.00015 in).

II.4.2. LUGAR DE APLICACIÓN DEL MEDIDOR DE DEFORMACIÓN

Como los strain gages miden un esfuerzo a lo largo de un área finita y algunas fuerzas están definidas únicamente en algún punto del área considerada, se pensaría que el strain gage mide tal vez una fuerza promedio en el área de medición. De esta manera si se tiene un esfuerzo uniaxial es decir sobre un solo eje y el strain gage es alineado con este eje, además si se considera que el gradiente de esfuerzo (razón de cambio del esfuerzo con la distancia a lo largo de la superficie) no varía, el esfuerzo promedio indicado por el strain gage será numéricamente igual al punto de esfuerzo en la sección media del strain gage. El fabricante proporciona el punto medio de cada strain gage; en el caso de tener un gradiente de esfuerzos variable se debe considerar el uso de un strain gage más pequeño porque en uno más grande no se tendría la certeza de la colocación de este punto.

En el caso de querer certificar la localización de un punto específico del esfuerzo se puede medir en 3 diferentes direcciones y encontrar su máximo valor; para estas mediciones existen medidores de deformación tipo roseta que tienen en si mismos las 3 diferentes direcciones y también existen en el tipo alambre y tipo hojuela ó lamina.

II.4.3. EQUIPO PERIFÉRICO AL MEDIDOR DE DEFORMACIÓN

Los cambios en la resistencia de los medidores de deformación son convertidos a cambios de voltaje por redes pasivas. A continuación se mencionarán algunas.

El circuito mostrado en la figura II.7 es un divisor de voltaje y puede ser usado cuando se necesitan medir las componentes dinámicas variables del esfuerzo. El voltaje de corriente directa que pasa por el medidor (mostrado como una resistencia variable y el símbolo ϵ) es eliminado de la salida debido a un capacitor de acoplamiento que solo deja pasar la componente del voltaje de corriente alterna.

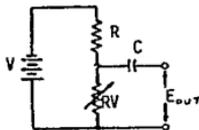


FIGURA II.7. CIRCUITO DIVISOR DE VOLTAJE PARA TRANSDUCCIÓN DE DEFORMACIÓN DINÁMICA.

Los puentes de Wheatstone son usados para los otros casos de medición de esfuerzos como son la medición de esfuerzos estático y dinámicos.

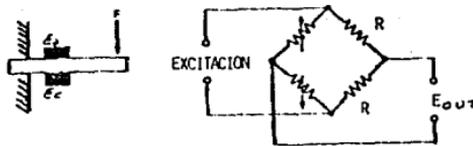
La fuente de poder para excitar el puente puede ser de corriente directa o de corriente alterna aunque la excitación con corriente alterna es preferida ya que por lo general es más fácil de amplificar. El puente esta balanceado y se tiene a la salida una diferencia de voltajes de cero cuando sobre el medidor de deformación no existe ninguna fuerza.

El circuito puente más usado para aplicaciones con medidores de deformación es el puente que tiene sus 4 ramas activas, lo cual significa que cada rama tiene un sensor.

Un puente con una sola rama activa se utiliza algunas veces y se le coloca en una rama adyacente al sensor otro medidor que no mide la

deformación sino que es para que este expuesto a la misma temperatura: se le utiliza como compensador de temperatura y se explicará más adelante.

También se puede usar un circuito puente con 2 de sus ramas activas como se muestra en la figura II.8. Mientras uno mide el esfuerzo de tensión el otro mide el esfuerzo de compresión si a la viga se le aplica una fuerza. El esfuerzo de tensión hace que la resistencia se incremente en uno de los medidores y el esfuerzo de compresión en el otro medidor hace que disminuya su resistencia eléctrica como lo indican las flechas en el puente. Como las fuerzas son en magnitud iguales, en consecuencia el voltaje a la salida del puente será el doble del medido en un puente que tiene una sola rama activa además de que se tiene la misma compensación a la temperatura.



**FIGURA II.8. PUENTE DE MEDIDORES DE DEFORMACIÓN
CON 2 RAMAS ACTIVAS.**

El tipo de arreglo de puente más usado para este tipo de mediciones es el que tiene sus 4 ramas activas y se muestra en la figura II.9 donde 2 sensores juntos miden el esfuerzo de tensión y otros 2 el esfuerzo de compresión.

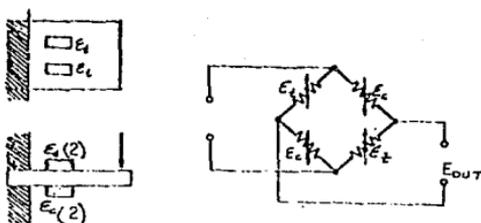


FIGURA II.9 PUNTE DE MEDIDORES DE DEFORMACIÓN CON 4 RAMAS ACTIVAS.

II.4.4. EFECTO DE HISTÉRESIS

Esta desviación ó efecto de histéresis ocurre cuando la resistencia de un medidor nuevo, en el primer retorno del ciclo de deformación, no vuelve a su valor original.

Es posible solucionar este problema repitiendo el ciclo de deformación unas 5 o 6 veces antes de tomar datos para evitar errores.

II.5. MONTAJE DEL MEDIDOR DE DEFORMACIÓN

A menos que el medidor tenga que ser soldado o empotrado, para montar un sensor de deformación la superficie en estudio debe limpiarse, lijarse y enjuagarse con alcohol, freón, o metil etil ketona (MEK). El medidor se pega permanentemente a la superficie con adhesivo Eastman 910, epoxy, polimida, o cemento cerámico. Se deben seguir al pie de la letra las instrucciones del fabricante que algunas veces suministran junto con los medidores no solo los adhesivos necesarios sino también herramientas especiales de instalación así como algunas veces ofrecen entrenamiento a técnicos de instalación. A continuación se dan una serie de pasos a seguir para instalar medidores de deformación.

a) Preparación de la superficie. Como ya se dijo se debe limpiar y lijar perfectamente la superficie en estudio justamente antes de instalar el medidor.

b) Pegamento. Debe seleccionarse un pegamento adecuado que puede ser del tipo de solvente suelto, epoxy, fenólico, polimida o para muy altas temperaturas usar cemento cerámico. Cada uno de estos tipos tienen diferentes métodos de instalación y diferentes tiempos de secado. Las temperaturas de secado varían para cada tipo de pegamento usado y puede ser tan alta como 320°C para los cementos cerámicos; el tiempo de secado también puede variar bastante y puede ser tan corto como 5 minutos o tan largo como 70 horas dependiendo del pegamento, del medidor y de la instalación.

c) Sujeción y secado. Cuando la instalación requiera sujetar el medidor se puede colocar una placa plana de metal con una tira de plástico que no tenga pegamento ni se pegue entre el medidor y la placa aplicando presión a la placa. La presión debe ser aplicada suavemente sobre toda la instalación de medición. Para superficies curvas la placa puede estar contorneada igual que la curva. Para instalar el medidor se trazan unas marcas sobre la estructura en estudio para ubicar el sensor y éste será colocado usando una cinta transparente como se ilustra en la figura II 10. La posición y orientación es mantenida cuando el pegamento es aplicado y el sensor debe ser presionado para quitar el exceso de pegamento.

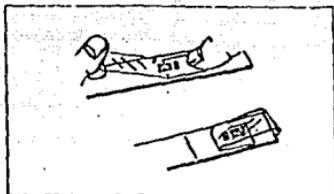


FIGURA II.10. INSTALACIÓN DEL MEDIDOR CON CINTA TRANSPARENTE.

d) *Prueba de humedad.* Después que se secó y se quitaron todos los dispositivos para sujetar debe hacerse una prueba de humedad que consiste en aplicar un compuesto de prueba de la humedad sobre la instalación del medidor.

Los cables que conectan las terminales del medidor con el circuito pueden estar soldados a la estructura en estudio o solamente pegados con pegamento.

II.5.1. PEGAMENTO

Anteriormente se dio una introducción general al montaje del medidor de deformación y aquí se abundará más en los pegamentos.

El pegamento tiene una función vital en el montaje del sensor ya que debe transmitir la deformación del espécimen al sensor con la menor distorsión posible, en efecto el pegado del medidor de deformación es quizá uno de los pasos más críticos en el proceso de la medición de deformación con estos sensores.

El pegamento usado en el instrumento es el Micro-Measurements M-BOND 43-B y los pasos a seguir para el pegado y el curado se pueden ver en los manuales del fabricante.

En general "curar" se refiere al horneado que se le da al medidor después de poner el adhesivo y tiene una temperatura y un tiempo específico.

Por ejemplo según el manual para el M-BOND 43-B el curado es de 2 horas a +190°C y el poscurado de 2 horas a +205°C, el poscurado sirve para aumentar el tiempo de vida del medidor, algunos lo necesita y otros no.

II.6. RESPUESTA

Los dispositivos periféricos al medidor de deformación es decir la instrumentación solo miden el cambio del sensor en resistencia DR y al medir este cambio de resistencia lo convierten en un cambio en la señal de voltaje. Los dispositivos que lo hacen, como ya se vio son los puentes de Wheatstone.

II.6.1. TIEMPO DE RESPUESTA

Con el desplazamiento considerado como la entrada y el voltaje en el puente como la salida, la respuesta de tal instrumento es instantánea (del orden de cero, si la propagación de onda es despreciada).

II.6.2. SALIDA DEL PUENTE DE WHEATSTONE

El medidor de deformación se coloca en un brazo de un puente de resistencia como se muestra en la figura II.11. Suponiendo que el sensor no esta deformado su resistencia es R y las demás resistencias R1, R2 y R3 son todas también iguales a R. Así $E1=E2=E/2$ y $E1-E2=0$, o si se cumple la siguiente relación :

$$R \cdot R1 = R2 \cdot R3$$

Donde R es la resistencia del sensor.

En estas condiciones se dice que el puente esta balanceado. Si se comprime el sensor de deformación, R aumentará por DR y el voltaje diferencial E1 estará dado por

$$E1 - E2 = E(DR/4R)$$

(II.14)

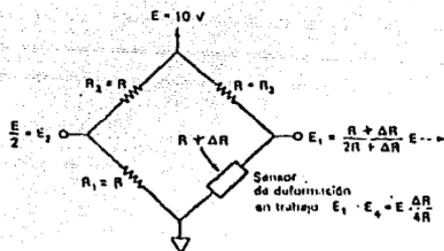


FIGURA II.11. MEDIDOR DE DEFORMACIÓN COLOCADO EN EL BRAZO DE UN PUNTE.

La salida de voltaje de un circuito medidor de esfuerzo es bastante pequeña (microvolts a milivolts), por lo tanto se hace necesaria la amplificación de la señal. Si se considera la utilización de más sensores en la estructura en estudio se puede también aumentar el voltaje de salida como ya se indicó en la sección II.4.3.

II.7. SENSIBILIDAD CON LA TEMPERATURA

Aunque se logre balancear el circuito puente de la figura II.11, no permanecerá así debido a que pequeños cambios en la temperatura del medidor de deformación causan un cambio de resistencia igual o más grande que los provocados por la deformación debido al fenómeno de dilatación o también llamado expansión diferencial térmica. Este problema se resuelve montando otro sensor de deformación idéntico y adyacente al sensor de deformación de trabajo, de modo que ambos compartan la misma temperatura

ambiental. Así conforme va cambiando la temperatura, la resistencia del sensor agregado cambia exactamente como la resistencia del sensor de trabajo. Por lo tanto el nuevo medidor da la compensación automática de temperatura.

II.7.1. MEDIDOR DE DEFORMACIÓN DE COMPENSACIÓN DE TEMPERATURA

Como teóricamente los efectos de la temperatura no se pueden calcular en los medidores de deformación la compensación se hace por experimentación. El arreglo para la compensación de la temperatura que se muestra en la figura II.12. da una idea de esto. El medidor 1 se instala en la estructura en estudio, mientras que el medidor 2 se coloca en otro lugar donde no sufra deformación y que esté a la misma temperatura que el medidor de trabajo.

Cualquier cambio en la resistencia del medidor 1 debido a la temperatura se cancela por los cambios similares que ocurren en la resistencia del medidor 2, y el circuito puente detecta una condición desbalanceada que resulta de la deformación impuesta en el medidor.

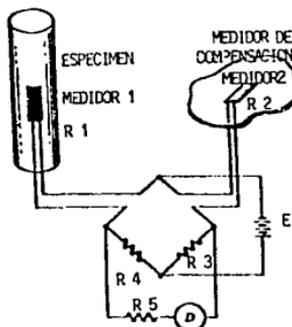


FIGURA II.12. ARREGLO DE MEDIDORES DE DEFORMACIÓN PARA LA COMPENSACIÓN DE LA TEMPERATURA.

II.8. LIMITACIONES

El esfuerzo más pequeño pero detectable depende del ruido térmico (ruido de Johnson) del voltaje generado en cada resistencia por el movimiento aleatorio de sus electrones.

Cuando los medidores de deformación son pegados debidamente se vuelven parte de la superficie a la cual están unidos y sufren el mismo esfuerzo que ésta.

Trabajan igualmente bien con la tensión y la compresión, puesto que el molde de cemento alrededor del alambre o la hoja previenen completamente cualquier doblez.

II.9. TIEMPO DE OPERACIÓN

Los medidores de deformación están fuertemente influenciados por las condiciones ambientales de trabajo. Los potenciómetros se desgastan por el rozamiento de contacto. Las averías en los medidores de deformación se pueden deber a la fatiga de las uniones o en las uniones soldadas. No existe un límite de resistencia (tensiones bajo las cuales las fallas nunca ocurren), las averías en los medidores son muy raras y pueden tomar varios millones de ciclos para que ocurran, pero es recomendable cubrir el medidor con cera para evitar las fallas en el pegamento debido a la humedad.

II.10. FABRICACIÓN DE LOS MEDIDORES DE DEFORMACIÓN

1) Los medidores de deformación de alambre metálico fueron los primeros en construirse. Consisten de un delgado alambre (menor de 0.025 mm de diámetro) colocado en zigzag sobre una base fija. El alambre está pegado a la base. Algunos tipos, llamados de "superficie transferible" se desprenden de su base fija y se colocan en la estructura en estudio. Otros están encapsulados dentro de algún material de aislamiento entre 2 placas delgadas de metal. Esto los hace fáciles de soldar a la superficie en estudio. Como los medidores planos o de hojuela son más fáciles de hacer en una gran variedad de tamaños y configuraciones dejaron obsoletos a los de alambre.

2) Los medidores de deformación tipo hojuela de metal son construidos gracias al avance logrado en las técnicas de fotograbado seguida por los mejoramientos en la producción en paralelo de estos circuitos impresos que permitieron el desarrollo y la producción en masa de estos medidores de bajo costo.

II.11. APLICACIONES TÍPICAS

Entre los usos más comunes de los medidores de deformación se tienen los mostrados en la figura II.13.

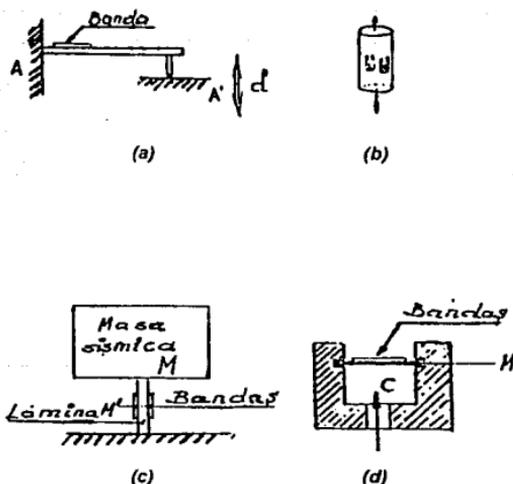


FIGURA II.13 a) Desplazamiento: Los desplazamientos relativos entre A(fijo) y A'(móvil) producen una deformación en la lámina de flexión, proporcional al desplazamiento d . b) Fuerzas, pesos: Una barra cilíndrica en tracción y/o compresión (evitar pandeo). c) Aceleración-vibración: La masa sísmica M es sensible a las fuerzas de aceleración y habrá proporcionalidad con la deformación que sufra a flexión la lámina M' . d) Presión: La membrana M se deforma si en la cámara C hay variaciones de presión.

II.12. ¿COMO SELECCIONAR UN SENSOR?

En general las principales consideraciones para seleccionar un sensor son :

- **Material:** verificar el material en donde será instalado, acero, aluminio, concreto, etc., existen medidores para cada material.
- **Orientación:** verificar si se usará un medidor uniaxial o uno multiaxial.
- **Tiempo de operación:** checar si el medidor se usará solo unos cuantos miles de ciclos.
- **Temperatura de operación.**
- **Pegado ó despegado.**

Existen otros criterios de selección pero para cada aplicación en general se tiene que referir al manual del fabricante.

CAPITULO III

ANÁLISIS DEL DISPOSITIVO

III.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se procede a examinar las características del proyecto desarrollado.

El objetivo es construir un dispositivo capaz de medir las fuerzas aerodinámicas que ejerce el aire sobre los cuerpos dentro del túnel de viento y poder extrapolar estos resultados a cuerpos de tamaño natural ya que en el túnel solo se experimenta con modelos.

Asimismo se analizará en detalle el diseño y construcción del dispositivo terminando con el ensamble y su funcionamiento.

III.1.1 NECESIDAD DE

La finalidad del dispositivo es medir lo más exacto posible las fuerzas a las que está sometido un cuerpo aerodinámico cuando se encuentra bajo los efectos del aire en movimiento. La finalidad del dispositivo es medir lo más exacto posible las fuerzas a las que está sometido un perfil aerodinámico cuando se encuentra bajo los efectos del aire en movimiento. Este dispositivo se diseña y construye para el uso del Departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental de la Facultad de Ingeniería que, aunque, ya cuenta con otro tipo de balanzas muy confiables nunca está por demás un diseño diferente. El dispositivo tiene fines didácticos y sus resultados pueden aplicarse a problemas de mayor escala.

Este dispositivo puede ser colocado en cualquier túnel de viento siempre y cuando no sea menor que el tamaño que tiene el dispositivo.

III.1.2. ANTECEDENTES

La base conceptual del dispositivo se encuentra en las balanzas que se usan para medir la masa de los cuerpos.

Este dispositivo esta basado principalmente en otro construido y diseñado por la compañía Inglesa Plint Engineers, Ltd. y que actualmente usa el C.I.A.C(Centro Internacional de Adiestramiento de Aviación Civil), y en los aparecidos en la literatura aeronáutica aunque con diferencias notables en su estructura para hacerlo más sencillo y barato sin disminuir su funcionalidad.

Existen diversos tipos de balanzas para medir las fuerzas ejercidas por el viento, cada una de ellas tiene su aplicación, ya sea para medir una o todas las fuerzas que ejerce el viento en los aviones; las fuerzas que se consideran mas importantes son:

FUERZA DE SUSTENTACIÓN

FUERZA DE ARRASTRE

FUERZA LATERAL

Y los momentos asociados son :

MOMENTO DE REVOLVIMIENTO

MOMENTO DE GUIÑO

MOMENTO DE CABECEO

A continuación en las figuras III.1 se muestran 3 tipos diferentes de balanzas pero existen más según la imaginación del diseñador.

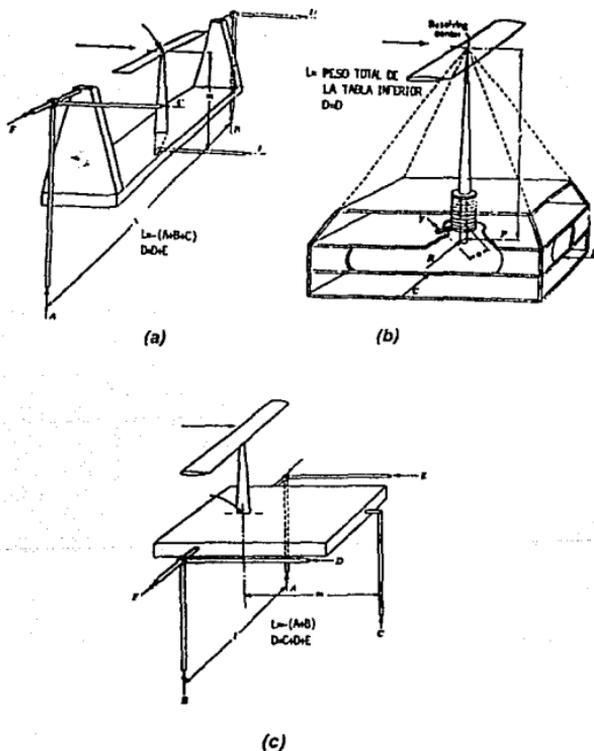


FIGURA III.1 DISTINTOS TIPOS DE BALANZAS

a) balanza de plataforma;

b) balanza piramidal;

c) balanza de yugo.

III.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

III.2.1. DISEÑO

Una balanza para medir las fuerzas del viento es un aparato bastante complicado según lo ha mostrado la experiencia al diseñar este dispositivo, sin embargo, es muy productivo y un motivante reto intelectual.

Las configuraciones mostradas en la figura III.1 no son las únicas que se pueden construir, existe otra configuración que puede ser más o menos complicada y que es usada en este proyecto, un esquema de la configuración se muestra en la figura III.2.

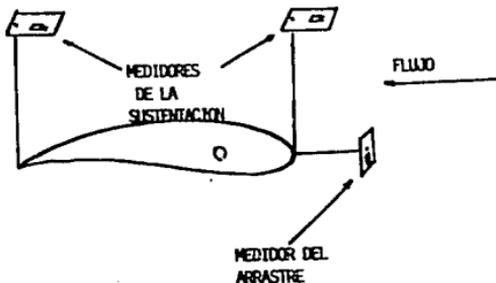


FIGURA III.2. CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO

El concepto de este dispositivo se basa en los medidores de deformación colocados estratégicamente para que "sientan" los cambios producidos por el viento en el perfil como se muestra en la figura III.2.

La configuración de la figura III.2 funciona de la siguiente manera:

Al circular el aire en la dirección mostrada produce fuerzas en el perfil y mueve las barras transmitiendo el movimiento a los medidores de deformación que al flexionarse cambian en su resistencia.

Si se considera el uso de cables en vez de barras para que el perfil no tenga ningún elemento extraño que afecte o perturbe las fuerzas que sobre él ejerce el aire, se debe poner el perfil de cabeza ya que una de las principales fuerzas que lo afectan es la fuerza de sustentación y con los cables

no se puede sostener el perfil, por lo que se coloca invertido como se muestra en la figura III.3, y tomamos la fuerza de sustentación en forma negativa.

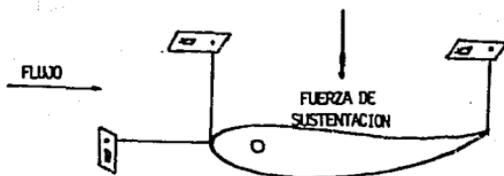


FIGURA III.3. CONFIGURACIÓN INVERTIDA

La configuración de la figura III.3 muestra el concepto de la medición de las fuerzas, esto consiste en 3 medidores de deformación donde cada uno mide una fuerza diferente; en la parte delantera del perfil y en la trasera se han colocado medidores para poder detectar los cambios en estos 2 lugares, al final de tomar las mediciones se suman las fuerzas y se obtiene la fuerza de sustentación, asimismo con la fuerza de arrastre.

Cabe aclarar que los medidores solo cambian en su resistencia al ser deformados y que se debe interpretar este cambio de resistencia como una función de la deformación $R = F(D)$; a su vez la deformación depende de la fuerza aplicada a cada medidor, entonces, $D = F(f) = R = F(F(f))$, lo que indica que el cambio en la resistencia depende del cambio en la fuerza.

III.2.2. FABRICACIÓN

III.2.2.1. PARTE MECÁNICA

Existen algunas consideraciones que se deben tener en cuenta para construir un dispositivo como el de la sección anterior principalmente en el manejo de los medidores de deformación.

El primer aspecto a considerar es que los medidores y los cables no pueden estar pegados al perfil ni dentro del flujo porque no sería posible discriminar las fuerzas, entonces lo que se hace es transmitir el movimiento por medio de un eje transversal como se muestra en la figura III.4.

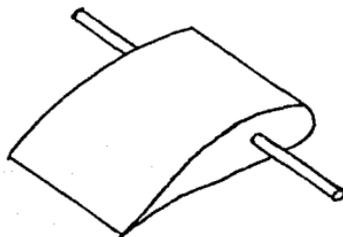


FIGURA III.4. EJE Y PERFIL AERODINÁMICO

El perfil de la figura III.4 tiene el eje transversal en el centro aerodinámico del perfil, este eje tampoco debe estar en contacto con el flujo, entonces, el ancho del perfil tiene que ser el mismo que tiene el túnel, pero considerando que al probar el dispositivo aparece un momento de guiño adverso a la fuerza de arrastre se consideró fabricar el perfil más pequeño que el ancho del túnel.

Las mediciones con los medidores de deformación tienen que ser directamente con el eje transversal, es decir, que el momento del eje tendrá que ser el mismo que el del perfil.

Para realizar las mediciones se adhiere al eje un soporte que contenga los medidores y los cables

La configuración descrita se materializa en la forma de un triángulo que "siente" los cambios en el movimiento del eje y se muestra en la figura III.5.

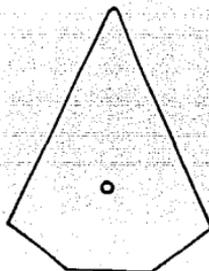


FIGURA III.5. TRIÁNGULO DEL SISTEMA

El triángulo de la figura III.5 es una placa que se mueve como lo hace el perfil ya que el movimiento es transmitido hacia éste desde el perfil, el eje que pasa por el perfil es el centro del triángulo.

Debido a que el eje no debe saturarse de fuerzas, el triángulo es soportado por 3 patas móviles que están colocados en los vértices del triángulo como se muestra en la figura III.6.

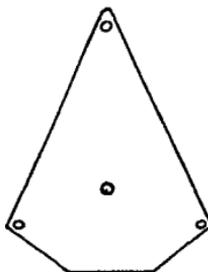


FIGURA III.6. COLOCACIÓN DE LOS SOPORTES MÓVILES

La configuración básica del dispositivo se muestra en la figura

III.7.

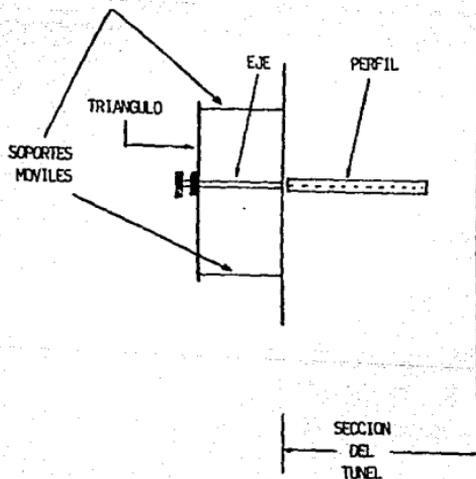


FIGURA III.7. CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO MOSTRADA DE PERFIL

Los medidores de deformación se colocan en otra placa que esta detrás del triángulo.

Al triángulo se le llama placa de fuerzas y a la placa trasera se le llama placa de montaje; el par de placas constituyen un sistema en sí y son enlazados por 3 varillas que tienen terminales llamadas Juntas Esféricas Universales (JEU) y se muestran en la figura III.8.

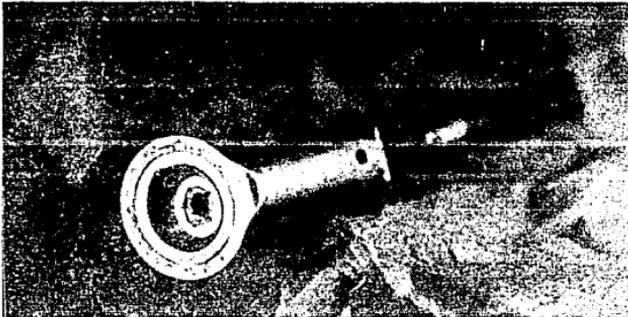


FIGURA III.8. JUNTURAS ESFÉRICAS UNIVERSALES

El objetivo de las JEU (figura III.8) es permitir el movimiento de la placa de fuerzas que transmite el movimiento por medio de cables a los medidores de deformación instalados en la placa de montaje, las terminales de ojillo están unidas a las placas dentro de tubos y un pequeño tornillo lo sostiene, en la figura III.9 se muestra esta unión de las 2 placas.

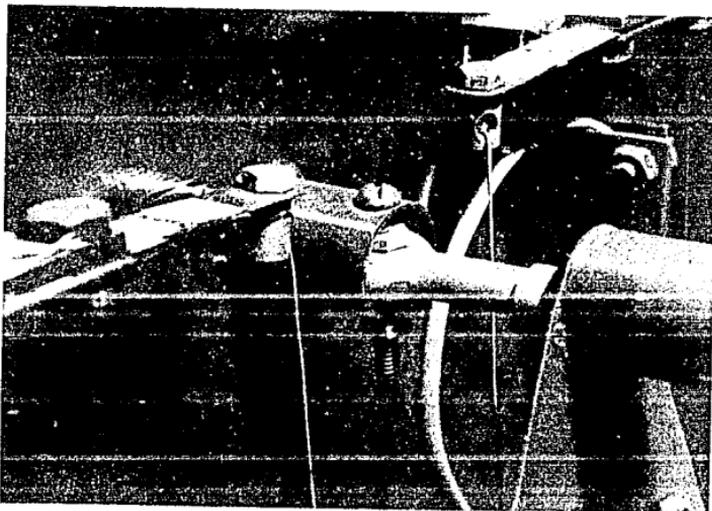


FIGURA III.9. PLACAS UNIDAS POR LAS JEU

Los medidores de deformación se encuentran instalados en una pequeña placa de acero que se encuentra aprisionada por 2 superficies de aluminio en la placa de montaje como se muestra en la figura III.10.

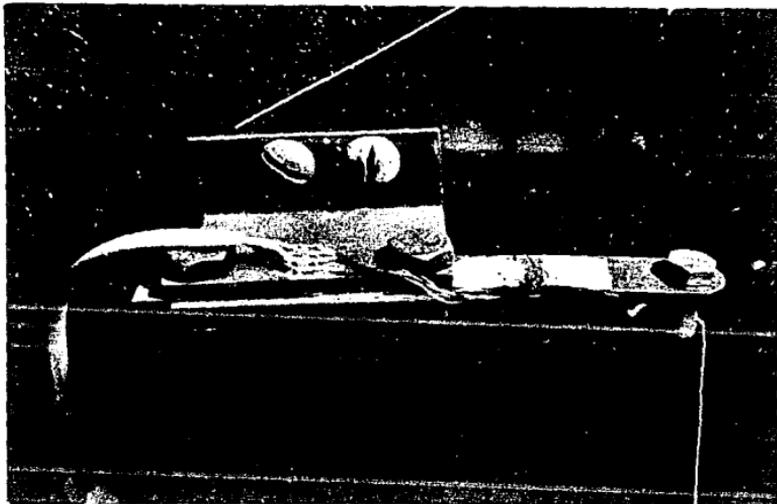


FIGURA III.10. PLACAS DE ACERO DE LOS MEDIDORES DE DEFORMACIÓN

En las placas de acero se encuentra un tornillo especial llamado prisionero y su misión es unir el cable con las placas de acero que contienen los medidores de deformación. El cable que transmite la fuerza a las placas de acero esta unido en sus 2 extremos por prisioneros y estos a su vez están unidos por placas de un lado de acero y del otro de aluminio, como se muestra en la figura III.11.



FIGURA III.11. CONFIGURACIÓN PRISIONERO-CABLE

En la placa de fuerzas(placa triangular) se instala el eje del perfil aerodinámico con una perilla para cambiar el ángulo de ataque del perfil, y se tiene una graduación en grados; para fijar el ángulo de ataque se instaló un pequeño tornillo con tuerca de mariposa, la configuración se muestra en la figura III.12

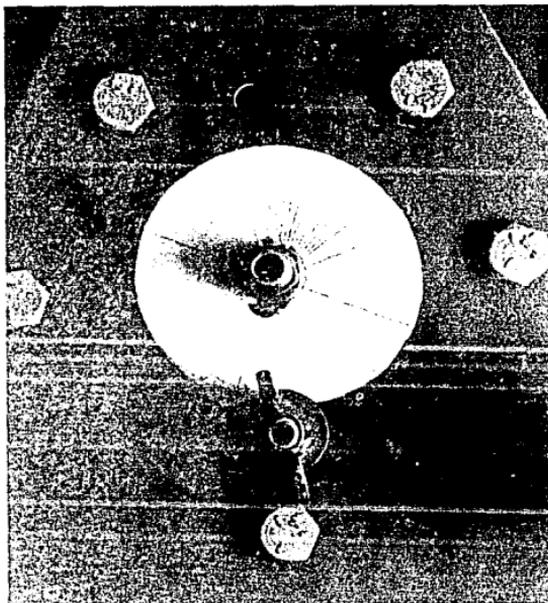


FIGURA III.12. CONFIGURACIÓN DE LA PERILLA DE ÁNGULO DE ATAQUE

Todo el dispositivo se coloca en una base vertical de madera que actúa de pared de separación con el túnel, así, la parte mecánica del proyecto queda como se aprecia en la figura III.13.

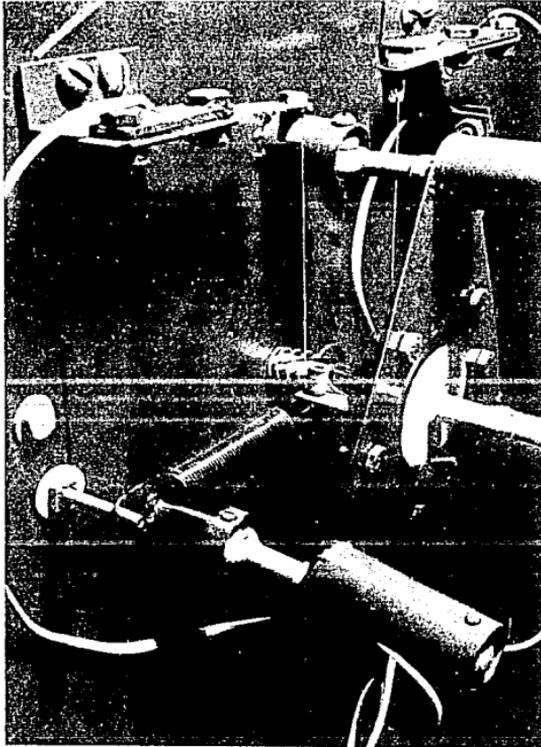


FIGURA III.13. PARTE MECÁNICA COMPLETA

III.2.2.2. PARTE ELÉCTRICA

Como se mencionó anteriormente la parte eléctrica del proyecto corresponde a los medidores de deformación (en inglés strain gage), y son el mecanismo sensor de los cambios de fuerza que el aire ejerce en el perfil aerodinámico.

En el capítulo correspondiente sobre los medidores se dijo que se colocan en puentes de Wheatstone para poder identificar los cambios de resistencia en términos del voltaje como en el esquema de la figura III.14.

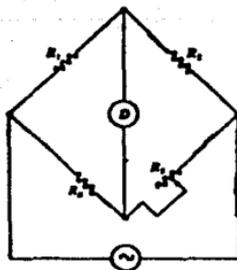


FIGURA III.14. PUENTE DE WHEATSTONE BÁSICO

Los medidores de deformación se colocan en vez de las resistencias de los brazos del puente; se colocan 4 medidores en los 4 brazos, uno es el medidor de trabajo, otro el compensador de la temperatura, y los 2 que le siguen como resistencias en los otros brazos, esto es porque se deben tener en el puente resistencias prácticamente iguales; la configuración final se esquematiza a continuación en la figura III 15.

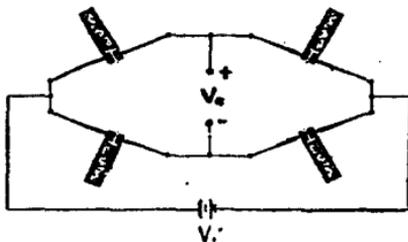


FIGURA III.15. ESQUEMA DE LA CONFIGURACIÓN

La expresión que define el balance del puente de Wheatstone la figura III.14 es la siguiente:

$$R1/R2 = R3/R4$$

Donde si cualquier valor en las resistencias cambia, entonces cambia el valor de la lectura en el voltímetro.

III.3. ENSAMBLE

El ensamble completo del dispositivo se muestra en la figura III.16.

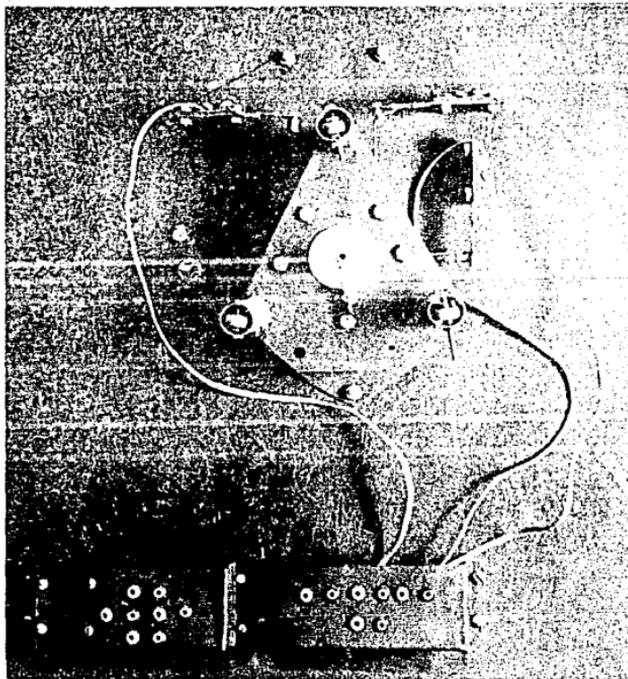


FIGURA III.16. ENSAMBLE COMPLETO DEL DISPOSITIVO

III.4. CALIBRACIÓN

La calibración del dispositivo, es decir, la relación entre las fuerzas y los voltajes de la lectura se llevó a cabo con pesas colocadas en el arreglo que se muestra en la figura III.17 :

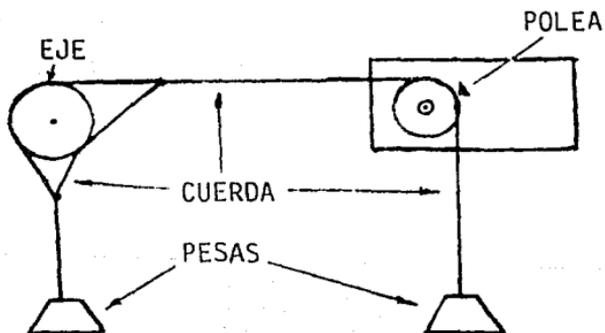


FIGURA III.17. ARREGLO DEL DISPOSITIVO PARA CALIBRACIÓN

Los resultados de esta calibración se muestran en las tablas de la figura III.18.

CALIBRACIÓN DEL ARRASTRE

PESO (Kg)	FUERZA (miliNewtons)	VOLTAJE (miliVolts)
0.005	49.05	3
0.010	98.1	3.2
0.015	147.15	3.4
0.020	192.2	4.1
0.025	245.25	5.6
0.030	294.3	6.4
0.035	343.35	7.2
0.040	392.4	10.9
0.045	441.45	9.4
0.050	490.5	12.4

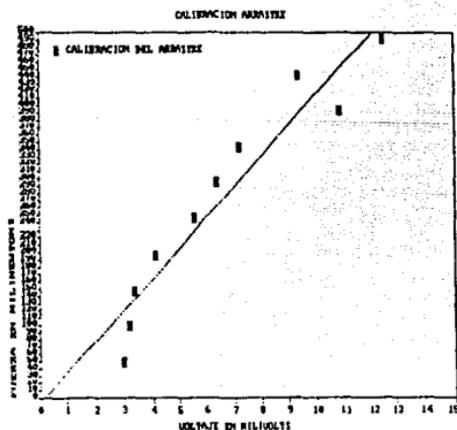


FIGURA III.18. GRÁFICAS DE CALIBRACIÓN DEL DISPOSITIVO

GRÁFICAS DE CALIBRACIÓN DEL DISPOSITIVO (continuación)

CALIBRACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN

PESO (Kg)	FUERZA (miliNewtons)	VOLTAJE (miliVolts)
0.005	49.05	2.8
0.010	98.1	5.4
0.015	147.15	8.4
0.020	192.2	12.4
0.025	245.25	13.4
0.030	294.3	13.4
0.035	343.35	17.8
0.040	392.4	21.6
0.045	441.45	21.6
0.050	490.5	25

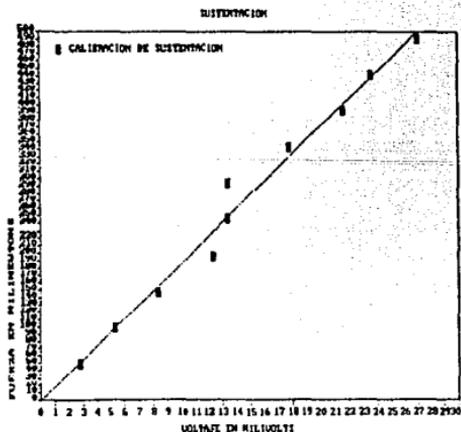


FIGURA III.18. GRÁFICAS DE CALIBRACIÓN (continuación)

movimiento sobre el perfil, según la lectura en voltaje de cada uno de los puentes.

En las tablas se tomaron en cuenta varias mediciones y los datos que se ven aquí son los promedios de las mediciones; además en los datos de la sustentación se suman las mediciones de la sustentación trasera más los datos de la sustentación delantera y la suma da la fuerza de sustentación total.

En la gráfica del arrastre, la recta obtenida que más se ajusta a la serie de puntos tiene por ecuación :

$$F_D = 42.07 \cdot V_D - 6.213$$

Donde : F_D = Fuerza de arrastre en millinewtons
 V_D = Voltaje del arrastre en milivolts

Y en la gráfica de la sustentación total (suma de la sustentación trasera más la sustentación delantera), la ecuación de la recta que más se ajusta a los puntos obtenidos es :

$$F_L = 18.58 \cdot V_L - 1.178$$

Donde : F_L = Fuerza de sustentación en milinewtons
 V_L = Voltaje de la sustentación en milinewtons

Las ecuaciones anteriores (obtenidas también mediante energraphix) se interpretan de la siguiente manera :

Para el arrastre por cada milivolt leído en el multímetro se tienen 42.07 milinewtons de fuerza de arrastre sobre el perfil y para la sustentación se tienen 18.58 milinewtons de fuerza de sustentación sobre el mismo perfil.

Con las ecuaciones anteriores se deducen los factores de calibración del dispositivo, y son :

$$F_D = 42.07 V_D [N/V] \cdot (\text{Valor leído en el multímetro en Volts})$$

$$F_L = 18.58 V_L [N/V] \cdot (\text{Valor leído en el multímetro en Volts})$$

Las gráficas obtenidas no son del todo exactas ya que se ajusta la recta que más se parezca a la curva que definen los puntos, pero si se desea hacer un cálculo mas fino de la calibración se pueden ajustar 3 rectas diferentes para diferentes rangos de voltaje y se obtienen 3 factores de calibración diferentes y si por alguna razón las mediciones se salen del rango de voltajes se extrapolan los datos de la calibración considerando la misma pendiente de la recta que define los factores de calibración. Las rectas obtenidas para el arrastre y la sustentación son de carácter práctico para que el usuario no pierda demasiado tiempo en el cálculo de los coeficientes, pero si se desea hacerlo con más precisión se puede recurrir a las gráficas de la figura III.19, sus pendientes se indican junto con ellas, cabe mencionar que si los voltajes obtenidos se salen del rango de la recta de más voltaje se pueden extrapolar los datos por motivos prácticos pero con reserva

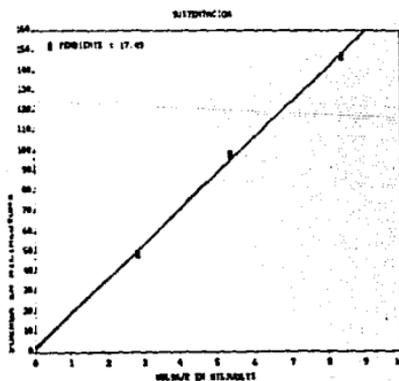


FIGURA III.19. GRÁFICAS ALTERNATIVAS DE CALIBRACIÓN.

III.5. FUNCIONAMIENTO

A continuación se describe el funcionamiento del dispositivo junto con algunas indicaciones sobre el cuidado con el que deben hacerse las mediciones ya que es un aparato muy delicado en su manejo, y deben observarse ciertas reglas para evitar que se descalibre y los resultados sean falsos.

En el esquema de la figura III.20 se muestran los paneles de datos del dispositivo.

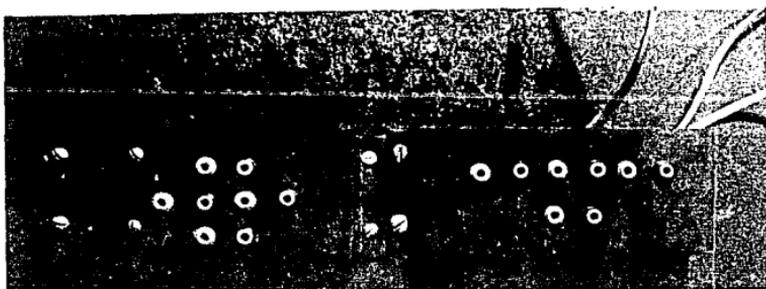
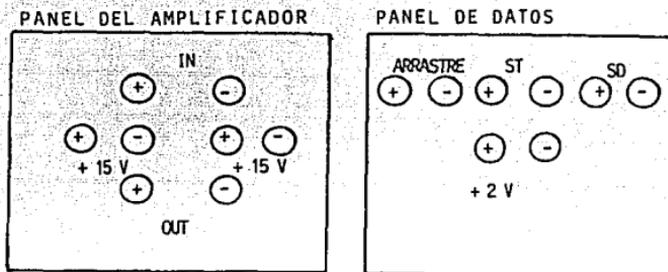
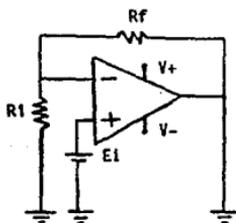


FIGURA III.20. PANELES DE DATOS Y DEL AMPLIFICADOR

Los medidores de deformación se alimentan con una fuente de +2 volts de corriente continua; las terminales de la fuente van conectadas en el panel de datos en la entrada de +2 volts. Las entradas marcadas con arrastre, sustentación trasera y sustentación delantera son las salidas de los puentes de wheatstone cada fuerza

El panel del amplificador tiene 2 pares de entradas marcadas con +15 volts y las terminales de las 2 fuentes de alimentación van conectadas ahí. La toma marcada con IN es la entrada al circuito amplificador y ahí se conecta la señal de salida del panel de datos, según sea el arrastre o la sustentación, y por último se tiene en el panel del amplificador la toma marcada con OUT que da la señal amplificada de los puentes de Wheatstone. En los paneles las entradas rojas, son la polarización positiva y las negras la polarización negativa.

La señal de voltaje que sale del panel de datos es amplificada 100 veces por un amplificador operacional que tiene una ganancia de 101 pero por motivos prácticos se considera de 100, el circuito se muestra en la figura III.21:



Donde: $A = 100$ (ganancia)
 $R1 = 10$ Ohms
 $Rf = 1$ kilo-Ohm
 $V+$ y $V-$ = +15 Volts
 Ei = Voltaje de salida de los medidores de deformación.

FIGURA III.21. DIAGRAMA DEL CIRCUITO AMPLIFICADOR

El perfil aerodinámico se coloca en el eje dentro del túnel y éste al "sentir" el aire sobre el perfil lo transmite a la placa de fuerzas y ésta a su vez mueve las placas de acero donde están colocados los medidores de deformación que convierten la deformación de las placas de acero en un cambio en el voltaje del puente de Wheatstone.

Para obtener la fuerza de sustentación total se tienen que sumar las fuerzas de sustentación trasera y las fuerzas de sustentación delantera.

III.6. OPERACIÓN

Para operar el dispositivo se comienza conectando las 2 fuentes de +15 volts al panel del amplificador y la fuente de +2 volts al panel de datos, después se conectan a cualquiera de las salidas del panel de datos 2 cables banana-banana negro y rojo al panel del amplificador en la entrada marcada con IN, después se toma la lectura con un multímetro en la salida marcada con OUT.

Se coloca el perfil en el eje y se alinea a cero grados con la perilla que esta en la placa de fuerzas soltando la graduación con la tuerca de mariposa que ahí se encuentra; se enciende el túnel y el variador de la velocidad, se toman lecturas a diferentes ángulos de incidencia del perfil para el arrastre, la sustentación trasera y la sustentación delantera.

Los voltajes obtenidos en el multímetro se toman teniendo en cuenta la lectura en reposo de cada medición ya que debido a la deformación que tienen las placas de acero por la tensión del cableado nunca esta en cero, entonces primero se debe poner a funcionar y parar el túnel dos o tres veces para que las placas se estabilicen y se conozca el voltaje en reposo.

CAPITULO IV

MEDICIÓN DE DISTINTOS PERFILES

IV.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se estudiarán las características geométricas de cada perfil para familiarizarse con él, y las ecuaciones para calcular los coeficientes de sustentación y de arrastre, también se explica el procedimiento para calcular estos coeficientes y las gráficas obtenidas en cada perfil.

La nomenclatura con que se designan los perfiles aerodinámicos N.A.C.A. se ha convertido en un estandar de la Ingeniería Aeronáutica desde que se desarrollo en los años 30's y 40's por el National Advisory Committee for Aeronautics antecesor de la actual NASA de Estados Unidos; en la serie de 4 dígitos tales como los NACA 0012 y NACA 2421 El primer dígito es la máxima curvatura en por ciento de la cuerda del perfil, el segundo dígito es la localización de la máxima curvatura a lo largo de la cuerda desde el borde de ataque en décimas de cuerda, y los últimos dos dígitos dan el máximo espesor en por ciento de la cuerda. Para el perfil 2421 la máxima curvatura es 0.02c y esta localizada en 0.4c desde el borde de ataque, y el máximo espesor es de 0.21c. Un perfil sin curvatura es decir con la línea de curvatura y la línea de cuerda coincidentes se llama perfil simétrico. La forma de un perfil simétrico es la misma arriba y abajo de la línea de cuerda. Por ejemplo, el perfil NACA 0012 es un perfil simétrico con un espesor máximo de 12% de la longitud de la línea de cuerda. Existen otras series de familias de perfiles donde se indican otros datos como el coeficiente de sustentación, etc. para más información se puede consultar la referencia 1.

Los perfiles construidos para los experimentos son el NACA 0012 y el NACA 2421 por ser muy comunes en la literatura de Ingeniería. Se diseñaron con una longitud de cuerda de 10cm (0.1m) y una envergadura de 20cm(0.2m), por lo tanto sus características son:

IV.2. PERFIL N.A.C.A. 0012

Cuerda 0 1m

Área 0.02m²

Curvatura máx. 0

Localización de la curvatura máx. 0 a partir del borde de ataque.

Máximo espesor 0.012m

Las características geométricas del perfil son las mostradas en la figura IV.1.

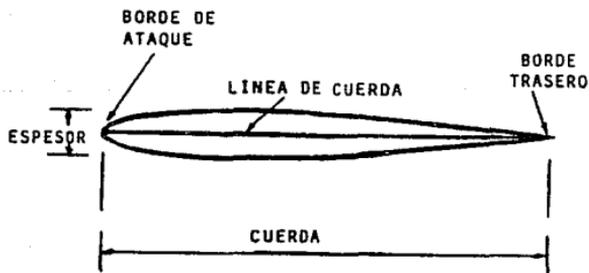


FIGURA IV.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL PERFIL N.A.C.A. 0012.

IV.3. PERFIL N.A.C.A. 2421

66

Cuerda 0.1m

Área 0.02m²

Curvatura máx. 0.002m

Localización de la curvatura máx. 0.04 a partir del borde de ataque.

Máximo espesor 0.021m

Las características geométricas del perfil son las mostradas en la figura IV.2.

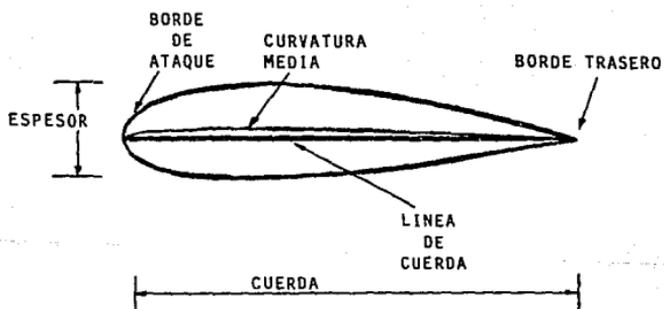


FIGURA IV.2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL PERFIL N.A.C.A. 2421.

Para medir las fuerzas ejercidas por el aire en movimiento se tiene que localizar el centro de presiones del perfil para sostenerlo con el eje del instrumento, este centro de presiones se mueve a lo largo de la línea de cuerda y su posición esta en función del ángulo de ataque del perfil, y por motivos prácticos se considera su localización en 0.25c, ya que en estudios realizados se comprobó que siempre esta aguas abajo de este punto partiendo del borde de ataque y se le llama centro aerodinámico.

Los coeficientes de arrastre y sustentación se calculan con las expresiones siguientes:

$$C_D = F_D / [(1/2)rV^2A]$$

$$C_L = F_L / [(1/2)rV^2A]$$

Donde : **F_D** : Fuerza de arrastre
 C_D : Coeficiente de arrastre
 F_L : Fuerza de sustentación
 C_L : Coeficiente de sustentación
 r : Densidad del aire=0.919 N/m³
 V : Velocidad del aire=9m/seg
 A : Área del perfil=0.02m²

Se realizaron mediciones para los dos tipos de perfiles y se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en las gráficas de las figuras IV.3., IV.4.,

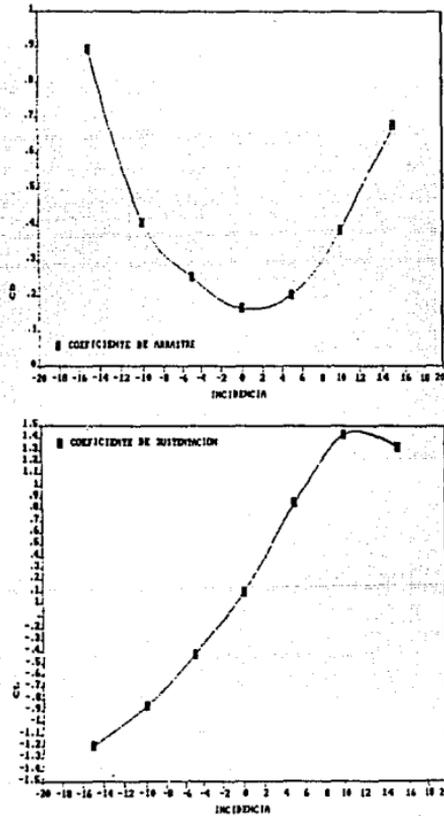


FIGURA IV.3. GRÁFICAS DEL ARRASTRE Y LA SUSTENTACIÓN PARA UN PERFIL NACA 0012

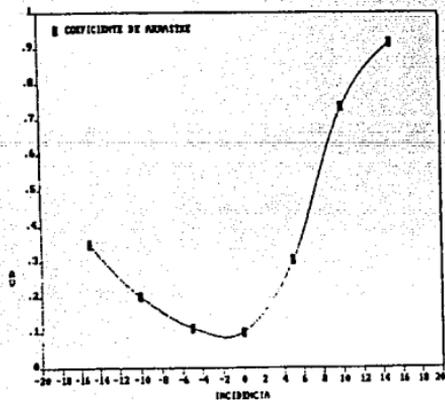
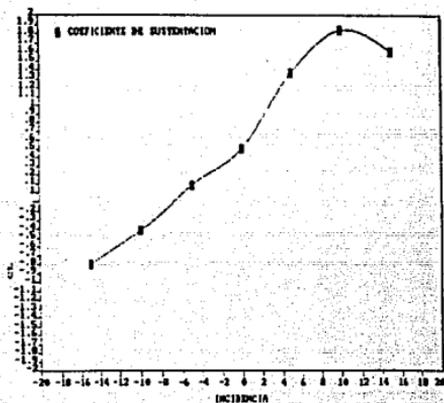


FIGURA IV.4. GRÁFICAS DEL ARRASTRE Y LA SUSTENTACIÓN PARA UN PERFIL NACA 2421.

ESTE LIBRO NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

CAPITULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Aquí se comparan los datos obtenidos con el instrumento diseñado y los datos obtenidos de la literatura, como por ejemplo las gráficas del NACA y por la compañía Piint Engineers, Ltd.

Antes de mostrar las gráficas debe hacerse notar que en estos experimentos se trabajó bajo un numero de Reynolds 4.5×10^6 . Las gráficas obtenidas por el NACA se muestran en las figuras V.1 y V.2 y las gráficas obtenidas por Piint Engineers Ltd. se muestran en la figura V.3.

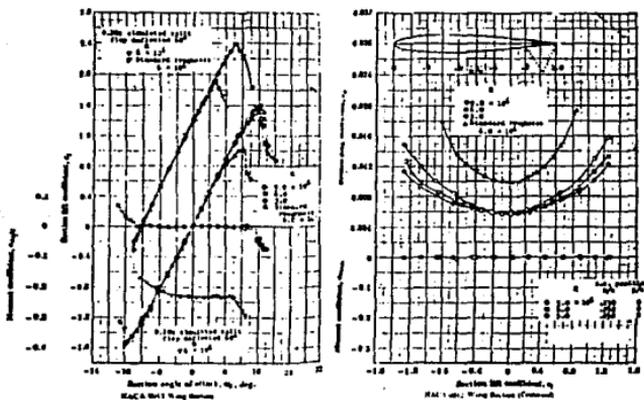


FIGURA V.1. GRÁFICAS DEL ARRASTRE Y LA SUSTENTACIÓN PARA UN PERFIL NACA 0012 OBTENIDAS POR EL NACA.

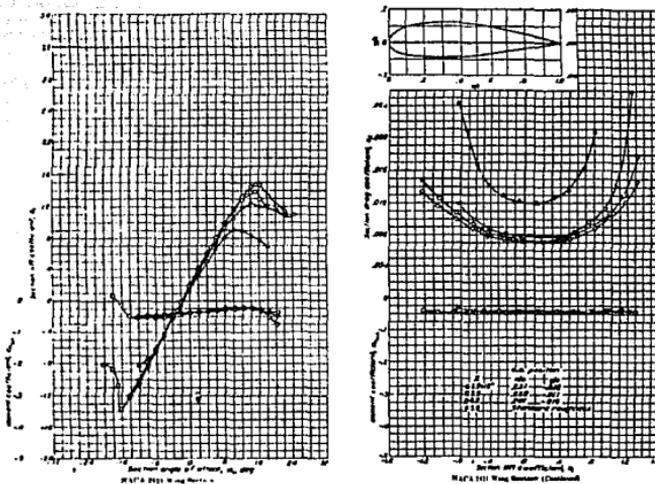


FIGURA V.2. GRÁFICAS DEL ARRASTE Y LA SUSTENTACIÓN PARA UN PERFIL NACA 2421 OBTENIDAS POR EL NACA.

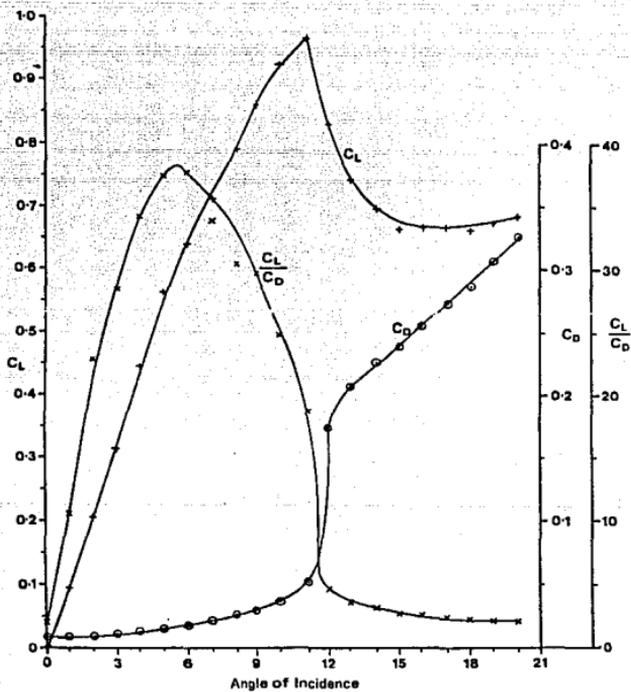


FIGURA V.3. GRÁFICAS DEL ARRASTRE Y LA SUSTENTACIÓN PARA UN PERFIL NACA 0012 OBTENIDAS POR PLINT ENGINEERS LTD.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se puede apreciar existen diferencias cuantitativas entre las gráficas obtenidas con el instrumento construido aquí, las gráficas del NACA y las de la firma inglesa Plint, esto se debe a diferentes factores como son:

1. El perfil no es exactamente el mismo que el NACA.
2. Se consideró un # de Reynolds diferente debido a la velocidad del viento.
3. Los perfiles utilizados en los experimentos no abarcan la totalidad de ancho del túnel es decir son finitos, mientras que los usados por el NACA se hicieron abarcando la totalidad del túnel de viento es decir su envergadura se considera infinita, esto es de especial consideración al medir la fuerza de arrastre. Las primeras pruebas se hicieron con perfiles ocupando la totalidad del ancho del túnel de viento pero se descubrió un momento de guiño adverso a la fuerza de arrastre ejercido por el aire. Para no cambiar el diseño se optó por recortar los perfiles, es decir, hacerlos de envergadura finita. También se adaptó un pequeño resorte para contrarrestar este momento en el eje.
4. Otros factores que tienen menor influencia son: La rugosidad de perfil es relativamente grande. Los errores de apreciación en el momento de tomar lecturas con la relativa variación de los valores, La densidad es variable dependiendo del lugar; El ajuste de la recta de calibración produce un cierto error sin embargo el comportamiento del modelo es similar al reportado.

Este proyecto puede ser utilizado ya sea para diseñar perfiles nuevos, para determinar las fuerzas de sustentación y arrastre de otros perfiles o de diferentes cuerpos que sean sumergidos en el aire dentro del túnel de viento; puede ser utilizado para mostrar a los alumnos de las diferentes materias de termofluidos los efectos que ejerce el aire en movimiento sobre las alas de los aviones.

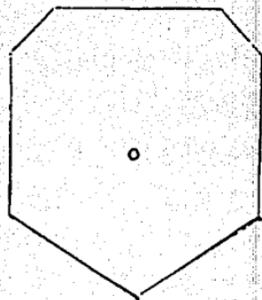
Aunque el dispositivo tiene algunas deficiencias principalmente en la lectura de los datos en la salida del amplificador, teniendo cuidado se puede lograr una gran exactitud en las gráficas de los coeficientes, además el objetivo principal es que sirva como apoyo didáctico para las materias del departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, ya que es motivante para los alumnos comprender como se miden experimentalmente los coeficientes y poder diseñar algún perfil como proyecto final.

Respecto a los medidores de deformación después de estudiarlos se llegó a la conclusión que el pegado de los sensores es la parte más delicada, además de que son elementos altamente sensibles.

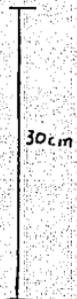
BIBLIOGRAFÍA

- 1. Abbot, I.H. y A. E., Von Doenhoff**
" *Theory of Wing Sections* "
Ed. Mc Graw-Hill, New York, N.Y., 1949.
- 2. Anderson, John D. jr.**
" *Fundamentals of Aerodynamics* "
Ed. Mc Graw-Hill, Singapore, 1985.
- 3. Coughlin y Driscoll**
" *Circuitos Integrados Lineales y Amplificadores Operacionales* "
Ed. Prentice Hall, Hispanoamericana, S.A.
2a edición, México, 1987.
- 4. Doebelin**
" *Measurement Systems* "
Ed. Mc Graw-Hill,
2a edición, New York, N.Y., 1983.
- 5. Holman**
" *Métodos Experimentales para Ingenieros* "
Ed. Mc Graw-Hill,
2a edición, México, 1984.
- 6. Norton, Harry N.**
" *Handbook of Transducers* "
Ed. Prentice hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.

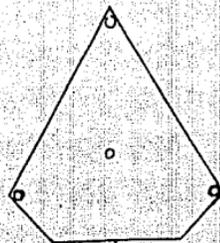
7. Pope, Alan.**" Low speed wind tunnel testing "****Ed. John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., 1984.****2a edición.****8. Vazquez Flores J. Félix.****Tesis " Análisis experimental de esfuerzos, extensometría
eléctrica "****ESIME, IPN., 1989.****9. White, F.M.****" Mecánica de los fluidos ",****Ed. Mc Graw-Hill, México, 1983.**



23.5 cm

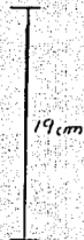


30 cm



8 cm

15 cm



19 cm