



\*D-5001\*

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**  
**Departamento de Ingeniería Mecánica**

**"CONVECCION FORZADA EN CILINDROS CON FUENTE  
DE CALOR Y ALETA RECTANGULAR AXIAL"**

*TESIS DE GRADO*  
*previa a la obtención del Título de*  
*INGENIERO MECANICO*

*Por*

**Arturo Miranda Vallejo**

**Guayaquil - Ecuador**

1978

ESCUELA SUPERIOR  
POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

CONVECCION FORZADA EN CILINDROS CON FUENTE  
DE CALOR Y ALETA RECTANGULAR AXIAL

TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de

INGENIEROMECANICO

POR:

ARTURO MIRANDA VALLEJO

Guayaquil - Ecuador

1978

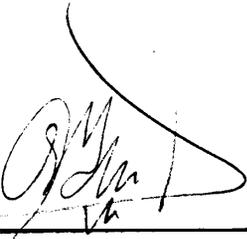
## DECLARACIONEXPRESA:

DECLARO QUE: Hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis son de mi exclusiva responsabilidad, y que el patrimonio intelectual de la misma corresponde a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).

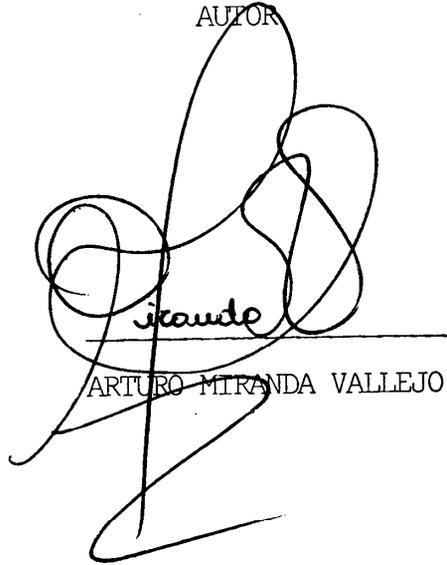
"CONVECCION FORZADA EN CILINDROS CON FUENTE  
DE CALOR Y ALETA RECTANGULAR AXIAL,"

DIRECTOR DE TESIS

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Galo Betancourt S.', written over a horizontal line.

ING. GALO BETANCOURT S.

AUTOR

A large, complex handwritten signature in black ink, appearing to be 'Arturo Miranda Vallejo', written over a horizontal line.

ARTURO MIRANDA VALLEJO

## DEDICATORIA

A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA  
DEL LITORAL



Amis queridos padres, por su siempre  
abnegada ayuda. Amis padres políticos

Ami esposa y pequeños hijos  
Xavier, Mónica y Mauricio

## CONTENIDO

	<u>Pág.</u>
PREFACIO	vi
NOMENCLATURA	vii
1.- INTRODUCCION	1
2.- OBJETO	3
3.- EQUIPO EXPERIMENTAL	4
3.1 Túnel de Viento	4
3.2 Pitómetro	9
3.3 Potenciómetro	11
3.4 Modelos de Prueba	12
4.- DUCTOS CIRCULARES LISOS'	15
4.1 Análisis Teórico	15
4.2 Experimentación	21
4.2.1 Fuerza de arrastre	21
4.2.2 Número de Nusselt	24
5.- DUCTOS CIRCULARES CON ALETA RECTANGULAR AXIAL	30
5.1 Experimentación	34
5.1.1 Fuerza de arrastre	34
5.1.2. Número de Nusselt	34
6.- COMPARACION DE RESULTADOS	39
6.1 Cilindro Simple Versus Cilindro con Aleta Rectangular Axial.	39
7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
APENDICE	43
A: Tablas	44
B: Gráficos	59
c: Figuras	80
D: Cálculos efectuados	82
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	85

## PREFACIO

El presente tema de tesis fue sugerido por el Ing. Galo Betancourt, catedrático del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Desde entonces debo agradecerle su ayuda prestada desinteresadamente.

Debo agradecer también la valiosa cooperación proporcionada por los asesores ingleses; George Costigan y Alan Slater por todo lo referente a la confección de los modelos experimentales.

## NOMENCLATURA

A	Area de la sección media del cilindro, $m^2$
C	Perímetro de la aleta
$C_D$	Coefficiente de arrastre, adimensional; $C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} V^2 A}$
$C_{D_c}$	Coefficiente de arrastre del cilindro
$C_{D_{c+p}}$	Coefficiente de arrastre del cilindro más la Placa
$^{\circ}C$	Grado centígrado
c	Calor específico
D	Diámetro del cilindro, m
E	Voltaje, -. volt;
f	Función de
G	Función de
g	Gravedad (constante) $m/s^2$
H	Presión dinámica por el-túnel de viento, m de H <sub>2</sub> O
h	Coefficiente de transferencia de calor, $Watt/m^2 \text{ } ^{\circ}K$
I	Intensidad de corriente, amp.
K	Conductividad térmica, $Watt/m \text{ } ^{\circ}K$
$K_f$	Conductividad fílmica, $Watt/m^2 \text{ } ^{\circ}K$
$^{\circ}K$	Grados Kelvin

L	Unidad de longitud
$l$	Longitud de la placa, m
M	Unidad de masa
Nu	Número de Nusselt, basado en el diámetro del cilindro, <u>adimensional</u> ; $Nu = hD/K_f$
$Nu_c$	Número de Nusselt del cilindro
$Nu_{c+p}$	Número de Nusselt del cilindro más la placa
$P'$	Potencia eléctrica, Watt
P	Presión
Q	Razón de transferencia de calor
$Q'$	Calor por unidad de volumen
$Q_o$	Flujo de calor en la base de la aleta
Re	Número de Reynolds, adimensional; $Re = \frac{V_\infty D}{\nu_\infty}$
$T'$	Unidad de tiempo
T	Temperatura °C
$T_o$	Temperatura de la superficie del cilindro, °C
$T_\infty$	Temperatura del flujo libre de aire, °C
$T'_f$	Temperatura <u>fílmica</u> , °C; $T'_f = \frac{T_o + T_\infty}{2}$
$T'_f$	Temperatura en el <u>extremo</u> de la aleta
AT	Diferencia de la temperatura de superficie libre del cilindro y la temperatura del <u>flujo</u> de aire, °C.

$V_{\infty}$	Velocidad del flujo libre de aire, m/s
$V$	Velocidad, m/seg
$X$	Longitud relativa de la aleta adimensional; $X = \ell/D$
$x$	Coordenada rectangular
$y$	coordenada rectangular
$z$	Coordenadarectangular

### LETRAS GRIEGAS

$\rho$	Densidad, $\text{Kg/m}^3$
$\mu$	Viscosidad dinámica
$\nu$	Viscosidad cinemática del flujo libre de aire, $\text{m}^2/\text{s}$
$\theta$	Posición angular en el cilindro, grados
$\pi$	Grupo Pi, análisis dimensional
$\phi$	Función de
$\psi$	-Diferencia de temperatura; $T - T'_f$ , grados centígrados
$\gamma$	Peso específico, $\text{grf/m}^3$

## 1.- INTRODUCCION

Para el diseño de intercambiadores de calor tipo tubular se requiere un conocimiento claro de la transferencia de calor y fuerza de arrastre que ejerce el paso de un fluido alrededor de cilindros circulares. →

Los diferentes análisis y estudios experimentales han sido realizados con el fin de incrementar la transferencia de calor y reducir la fuerza de arrastre.

El estudio del comportamiento fluídico y térmico alrededor de cilindros circulares ha sido bastante desarrollado, encontrándose que análisis teóricos para la parte frontal han proporcionado resultados aceptables a la realidad experimental. Sin embargo, para la parte posterior, debido a la complejidad del fenómeno, no ha sido posible establecer relaciones matemáticas que representen el comportamiento fluídico y térmico, y más bien todos los datos existentes se deben a tomas experimentales.

La variación de la fuerza de arrastre de un fluído al avanzar alrededor de cuerpos ha sido establecido, gracias al análisis dimensional, como una función del número de Reynolds, es decir  $C_D = f(R_e)$ . Los valores experimentales demuestran una reducción del coeficiente de arrastre a medida que el número de Reynolds incrementa.<sup>(\*)</sup>

La transferencia de calor, igual que la fuerza de arrastre, puede ser expresada como una función del número de Reynolds y la posición angular, o sea  $Nu = f(Re, \theta)$ .

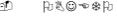
Los resultados experimentales observados en los datos presentados por Eckert and Soehngen,<sup>(2)</sup> para ductos largos, se encuentra una variación del número de Nusselt, con un mínimo para el punto de sepa

---

\* El número entre paréntesis colocado en la parte superior corresponde a la referencia bibliográfica.

ración.

En este trabajo, agregaremos una placa plana rectangular integrada al cilindro, implicando ésto el incremento de una nueva variable que es la longitud relativa; longitud de la placa dada en diámetros del cilindro, es decir; que la variación del arrastre sería  $C_D = f(\text{Re}, X)$ . De igual manera, una nueva variable aumenta en la relación correspondiente a la transferencia de calor, ésto es  $\text{Nu} = f(\text{Re}, \theta, X)$ .

2. 

El presente trabajo experimental tiene como objetivo primordial la investigación de la transferencia de calor por convección forzada debido al flujo de cilindros con placa rectangular integral; paralela al flujo y colocada en la parte posterior, con una fuente de calor en su parte central axial.

Para el desarrollo del trabajo anteriormente planteado, se experimentará el comportamiento del cilindro, tanto solo como con la placa rectangular posterior, sumergido en un flujo de aire, a fin de establecer la fuerza de arrastre producida y sus diferentes valores para distintos números de Reynolds y longitudes de placa.

Posterior a la investigación netamente fluídica, se procederá al estudio experimental del fenómeno de transferencia de calor, para lo cual se colocará una fuente de calor axialmente central y se someterá el modelo a varios flujos de aire.

Bajo las condiciones previstas del modelo se espera, de esta forma, reducir la fuerza de arrastre e incrementar la transferencia de calor, logrando con ésto un desarrollo importante para el diseño de intercambiadores de calor. Los resultados serán presentados en base a los parámetros adimensionales. Para la investigación fluídica, se presentará la variación del coeficiente de arrastre versus el número de Reynolds, efectúandose una comparación entre el cilindro simple y aquel con la aleta rectangular axial. Los datos experimentales de transferencia de calor se presentará en base a las variaciones del Número de Nusselt local; posiciones angulares y el Número de Reynolds, tanto para el cilindro simple como el con la aleta rectangular axial. Además, se incluirá la variación de los números de Nusselt locales, para un mismo Reynolds, para diferentes longitudes de aletas.

### 3.- EQUIPO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Túnel de Viento

El túnel de viento es un aparato utilizado para producir un flujo uniforme de aire en el cual las propiedades aerodinámicas de los cuerpos pueden ser observadas y medidas. Hay tres tipos de túneles; de circuito abierto, de circuito cerrado y de aire comprimido (densidad variable).<sup>(3)</sup>

El túnel de viento de la ESPOL es subsónico tipo circuito abierto, el mismo que consiste esencialmente de un ducto convergente rectangular a través del cual el aire es extraído del medio ambiente, hasta su extremo final, y descargado al mismo medio. La entrada del tubo es ligeramente curvada a fin de reducir las perturbaciones debido a la entrada. Además, se incluye una malla de cartón que hace uniforme al flujo. Este

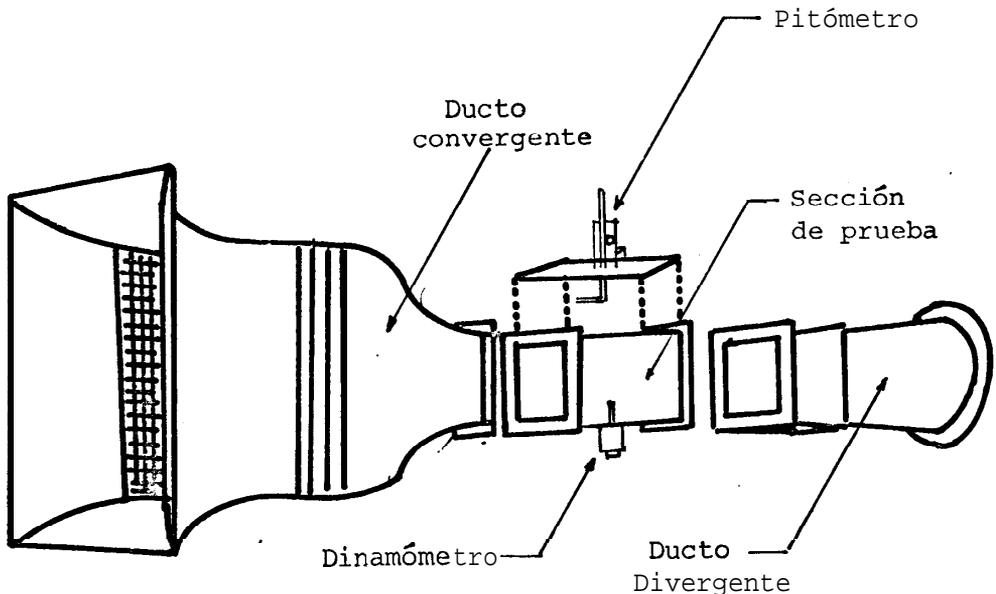


Fig. 1.- TUNEL SUBSONICO DE VIENTO; ESPOL

túnel incluye una sección de prueba con los correspondientes accesorios tales como el dinamómetro, transductor de presión, cabina de control digital y el pitómetro, Fig. 1.

La máxima velocidad del túnel de viento es 40 m/s.

(4)

### 3.1.1 Conjunto de dinamómetros

El conjunto mide las fuerzas de sustentación y arrastre por medio de dos dinamómetros programados para responder a fuerzas que actúan en ángulo recto; una con respecto al otro.

Las dinamómetros son similares en construcción y operación, utilizando dos vigas de aluminio colocadas paralelamente, como se muestra en la figura 2. Las vigas son diseñadas para responder con gran sensibilidad a la fuerza que actúa con rangos de cargas.

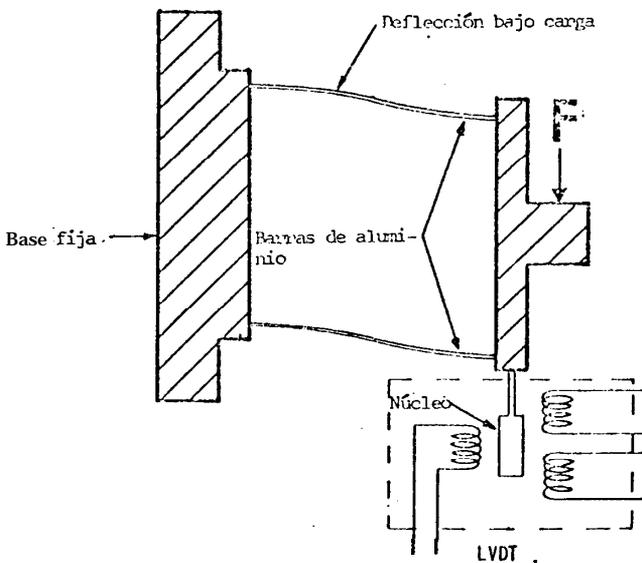


FIGURA 2.- DINAMOMETRO

La fuerza de sustentación o arrastre aplicados a los di  
namómetros produce una deflexión de las vigas en for-  
 ma directamente proporcional a la magnitud de la fuer-  
 za. Esta deflexión es detectada por un control auto-  
 mático (transformador de variable diferencial lineal),  
 que tiene un núcleo móvil que se encuentra unido a una  
 armadura. La señal de salida de cada embobinado (se -  
 cundario, primario) del control automático son determi-  
 nados por el puente con un núcleo en el extremo. El  
 resultado lo determina la señal de corriente que repre-  
 senta la dirección y magnitud de la fuerza aplicada.

El voltaje de entrada al transformador es obtenido de  
 otro transformador que cambia el voltaje de 95-130 volt  
 a 6 volt + 1%.

### 3.1.2 Transductor de presión <sup>(4)</sup>

El transductor de presión es de tipo diferencial y uti-

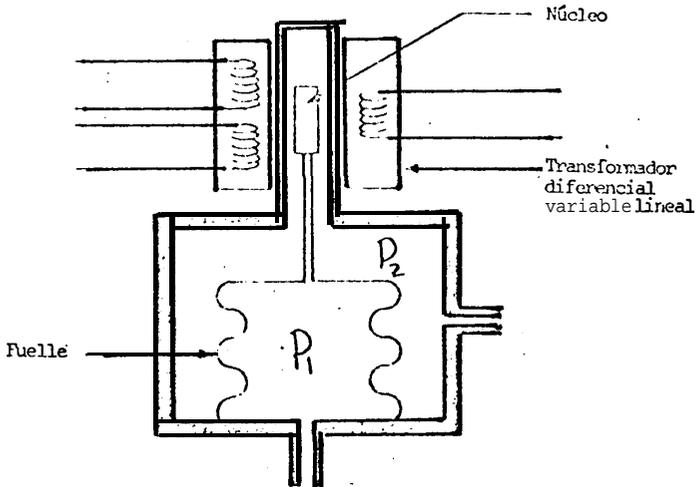


FIGURA 3.- DIAGRAMA DEL TRANSDUCTOR DE PRESION

liza un fuelle metálico con un control automático similar al anteriormente mencionado, figura 3. La presión total es aplicada al fuelle y la presión estática ocupa la cámara que rodea al fuelle.

Cualquier cambio en la presión da como resultado un desplazamiento del fuelle con el consiguiente movimiento del núcleo (diodo) del control automático.

Este desplazamiento, que es función lineal del cambio de presión, es detectado por el control automático (em bobinados primario-secundario). La señal eléctrica de salida representa la diferencia de presión, o sea la presión dinámica.

### 3.1.3 Sección de prueba <sup>(4)</sup>

Esta sección tiene un área de 12" x 12". La velocidad puede ser medida en un plano normal de la sección de prueba ya que en la mitad de la parte superior hay un canal que permite el movimiento del pitómetro en sentido longitudinal. Así mismo, existe una cremallera que permite el desplazamiento vertical del tubo de pitot para la medición de la antes mencionada velocidad.

La posición exacta de la medición de la velocidad de prueba puede ser detectada por un botón giratorio del potenciómetro. La señal eléctrica de salida del potenciómetro representa los ejes de abscisa y ordenada de la prueba.

### 3.1.4 Cabina de control <sup>(4)</sup>

Las señales eléctricas en la cabina representan cinco variables; sustentación, arrastre, presión, eje de abscisas y eje de ordenadas, siendo transmitidas en un mo

mento dado por el cable conectado. El Potenciómetro es tá provisto de un circuito que regula el voltaje de en trada al visor digital. El visor digital puede ser ca librado para que de la lectura en la unidad deseada.

El Sistema está calibrado para dar la lectura en la for ma siguiente:

Sustentación y arrastre ..... Kg.  
 Presión ..... metros  
 Coordenadas rectangulares ..... centímetros

Las lecturas de las fuerzas, la presión o las coordenada s pueden ser observadas por medio de un selector co locado en la parte superior derecha de la ca bina, Fig. 4.

Todos los componentes eléctricos del circuito son pro-

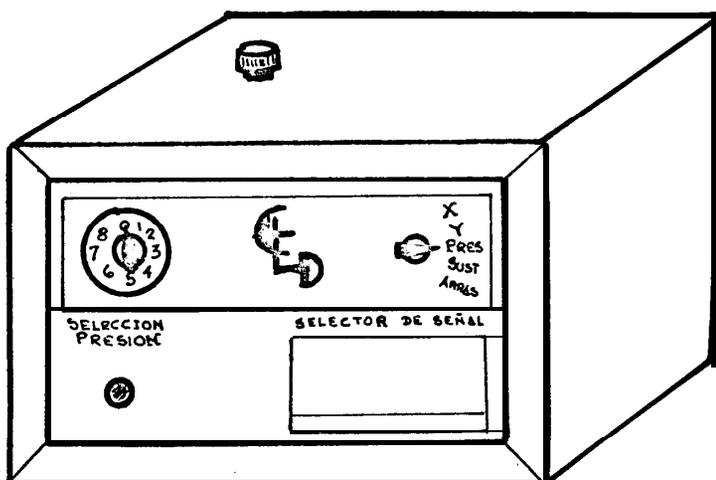


FIGURA 4.- CABINA DE CONTROL

tegidos por fusibles de 2 amperios. Existe un interruptor de botón para administrar corriente eléctrica a la cabina y lograr el encendido de la misma, Fig. 5.

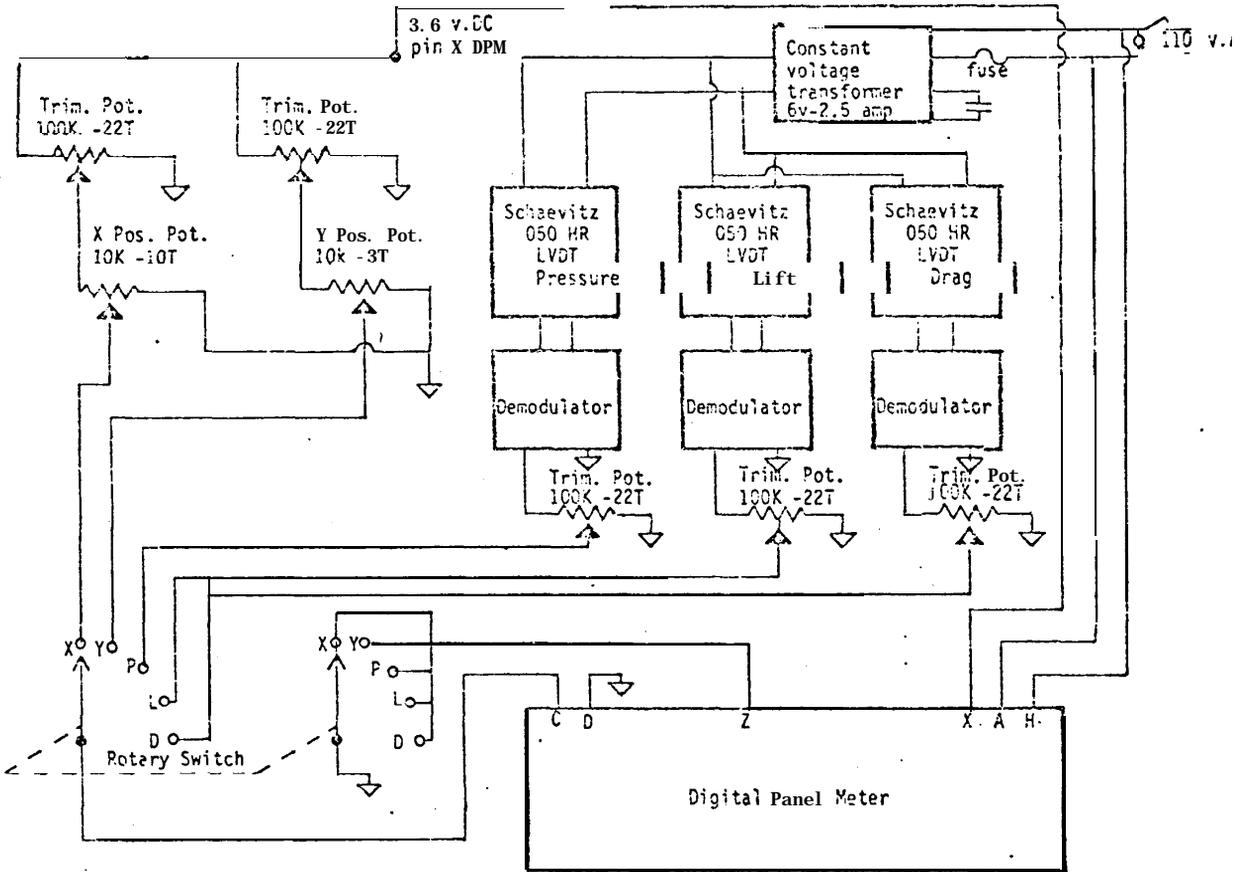


FIGURA 5.- CIRCUITO ELECTRICO DE CABINA DE CONTROL

### 3.2 Pitómetro <sup>(3)</sup>

La medida de la velocidad del aire se efectúa por medio de un instrumento llamado tubo de Pitot-Estático. Este consta de dos tubos uno de los cuales forma un ángulo recto y es colocado en la mitad superior de la sección de prueba del túnel de viento, asegurado su extremo a un eje cremallera que permite

que tenga dos movimientos; uno longitudinal en dirección del flujo (eje X) y el otro transversal (eje Y). Cabe mencionar, además, que del extremo del tubo que se agarra a la cremallera sale una manguera que se conecta a un transductor de presión. El otro extremo del tubo es abierto y colocado en dirección del viento, lo que permite leer la presión de estancamiento  $P_0$  sea la presión total, que es la suma de la presión dinámica (energía cinética) y la presión estática. El otro tubo es un poco más delicado de colocar, pues para ésto se debe hacer un orificio pequeño en la parte inferior de la pared de la sección de prueba, normal al eje de las abscisas, orificio cuyo diámetro para piezas sólidas debe ser de 0.01 a 0.02 pulgadas de diámetro (particularmente si es colocado donde

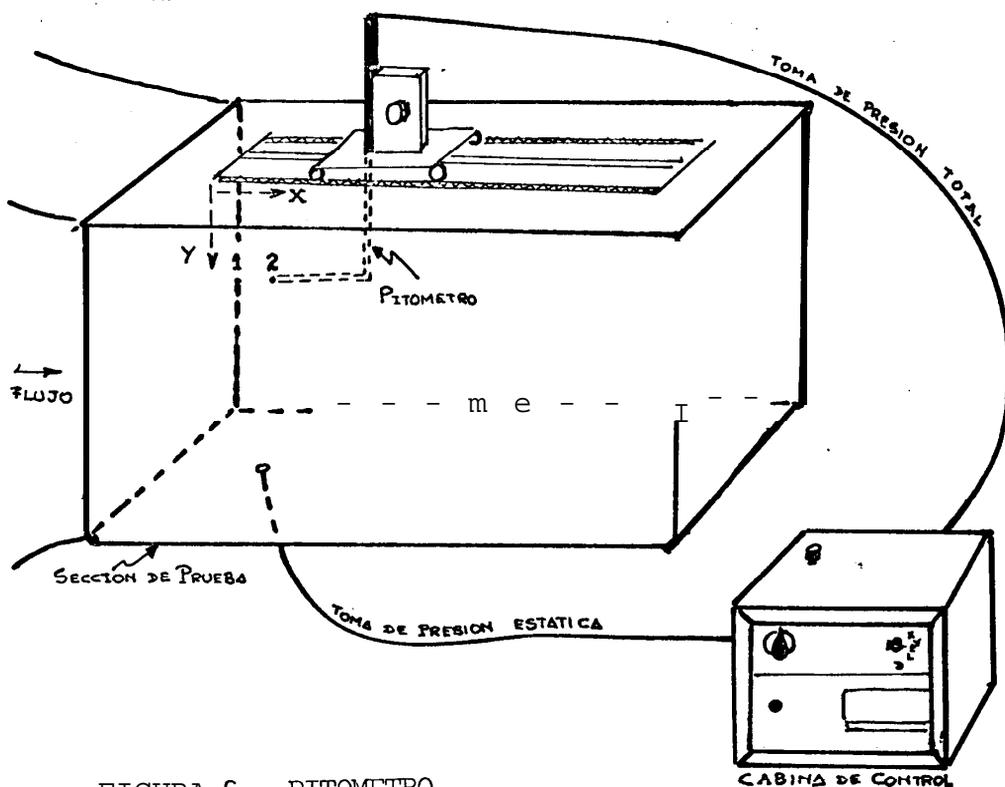


FIGURA 6.- PITOMETRO

existen grandes gradientes de presión). En el orificio efectuado se coloca una manguera que nos permitirá leer Únicamente la presión estática. El otro extremo de la manguera se conecta, también, al transductor de presión, pero opuesta a la correspondiente presión total. Todo lo anterior da como resultado que nos aparezca, en una pantalla digital, sólo la presión dinámica que para efectos del túnel de viento del Laboratorio de Fluidos se expresa en metros de agua, figura 6.

### 3.3 Potenciómetro <sup>(5)</sup>

La medición de la temperatura sobre la superficie de los modelos térmicos previstos se las efectúa en base al efecto eléctrico producido por la termocupla, la misma que corresponde a dos cables de metales diferentes, como se muestra en la figu-

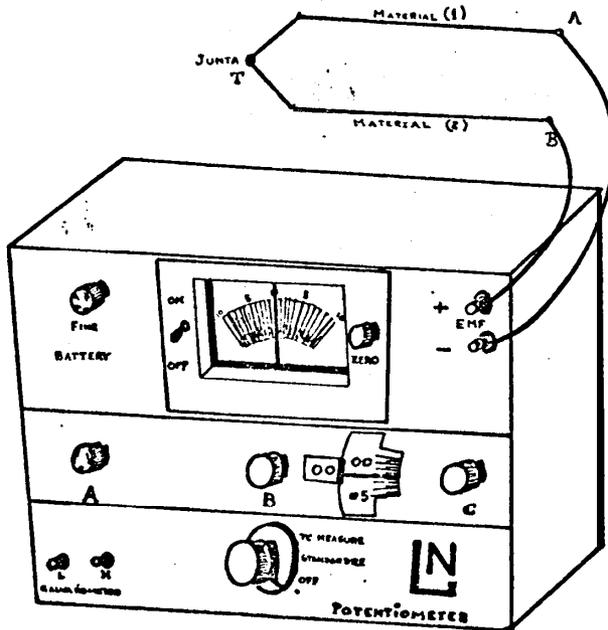


FIGURA 7.- POTENCIOMETRO

ra 7, que al unirse generan una fuerza electromotriz entre los puntos A y B, lo cual es, principalmente, función de la temperatura de la junta T; este fenómeno es conocido como el efecto de Seebeck.

Las termocuplas utilizadas son de Cobre-Constatan por cuanto aquellas tienen un rango de operación de  $-270^{\circ}\text{C}$  hasta  $400^{\circ}\text{C}$ ; cubriendo la variación de temperaturas previstas para el ensayo experimental.

Para el experimento térmico se ha utilizado un potenciómetro, modelo 8686, Leeds and Northrup, el mismo que ha permitido efectuar mediciones precisas de los voltajes pequeños generados por las termocuplas instaladas en el modelo experimental.

### 3.4 Modelos de Prueba

Para la realización de los experimentos se ha seleccionado ci lindros simples y con aleta rectangular axial, los mismos que han sido fundidos localmente. El material utilizado ha sido aluminio debido a que las propiedades de este material son las más convenientes.

El aluminio tiene como características importantes las siguientes:<sup>(6)</sup>

Densidad.- A  $293^{\circ}\text{K}$ , su densidad es  $2701,1 \text{ Kg/m}^3$ , siendo este valor el más bajo de los metales conocidos, implicando el mínimo peso en la elaboración de los modelos.

Difusividad térmica.- A  $293^{\circ}\text{K}$ , su difusividad térmica es  $9.16 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ., siendo éste un valor bastante apreciable comparado con la mayoría de los metales.

Conductividad térmica.- De  $293^{\circ}\text{K}$  a  $573^{\circ}\text{K}$ , la conductividad se mantiene constante con un valor de  $229 \text{ watt/m}^{\circ}\text{K}$ , siendo ésta invariabilidad de la conductividad térmica la que permite un

mejor desarrollo de labres experimentales en transferencia de calor.

Emisividad.- El aluminio tiene una emisividad muy baja.

Se construyeron dos tipos de modelos; los cilindros lisos y los con la placa rectangular axial en su parte posterior.

Los modelos para la experimentación fluídica, consisten en dos cilindros sólidos, uno acanalado axialmente en su parte posterior a fin de adaptar placas rectangulares de diferentes longitudes. Estos modelos pueden ser representados en la forma siguiente; Figura 8.

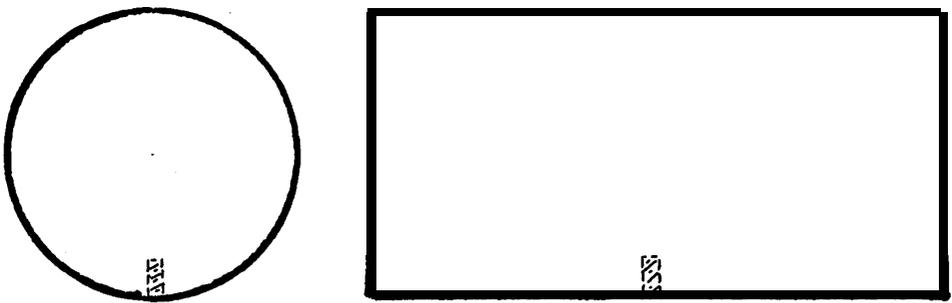


FIG. 8<sup>a</sup> .- Modelo de prueba fluidico .VISTA LATERAL DEL CILINDRO.

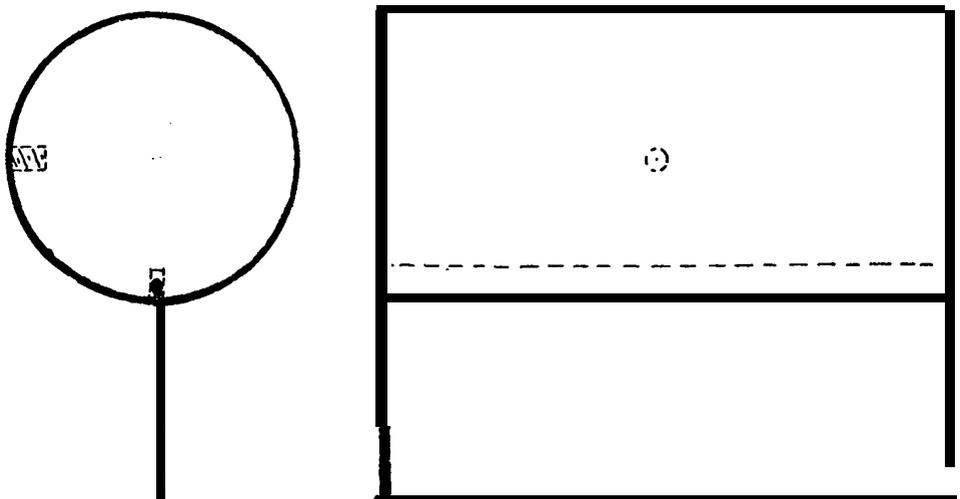


FIG. 8<sup>b</sup> .- Modelo de prueba fluidico .VISTA SUPERIOR DEL CILINDRO CON ALETA.

Para la experimentación térmica, de igual forma que la anterior, se fundieron dos cilindros sólidos con la diferencia que el correspondiente a la placa anexa debía estar integrada desde su fundición, a fin de lograr homogeneidad del material en la unión del cilindro y la aleta. Una alternativa posible para el modelo último era fundir independientemente el cilindro y la aleta, para luego efectuar la unión por soldadura; implicando una variación en la estructura del material y un fácil maquinado de los elementos, no así en el caso de la fundición del modelo integrado. Estos modelos pueden ser representados como; ver Figura 9.

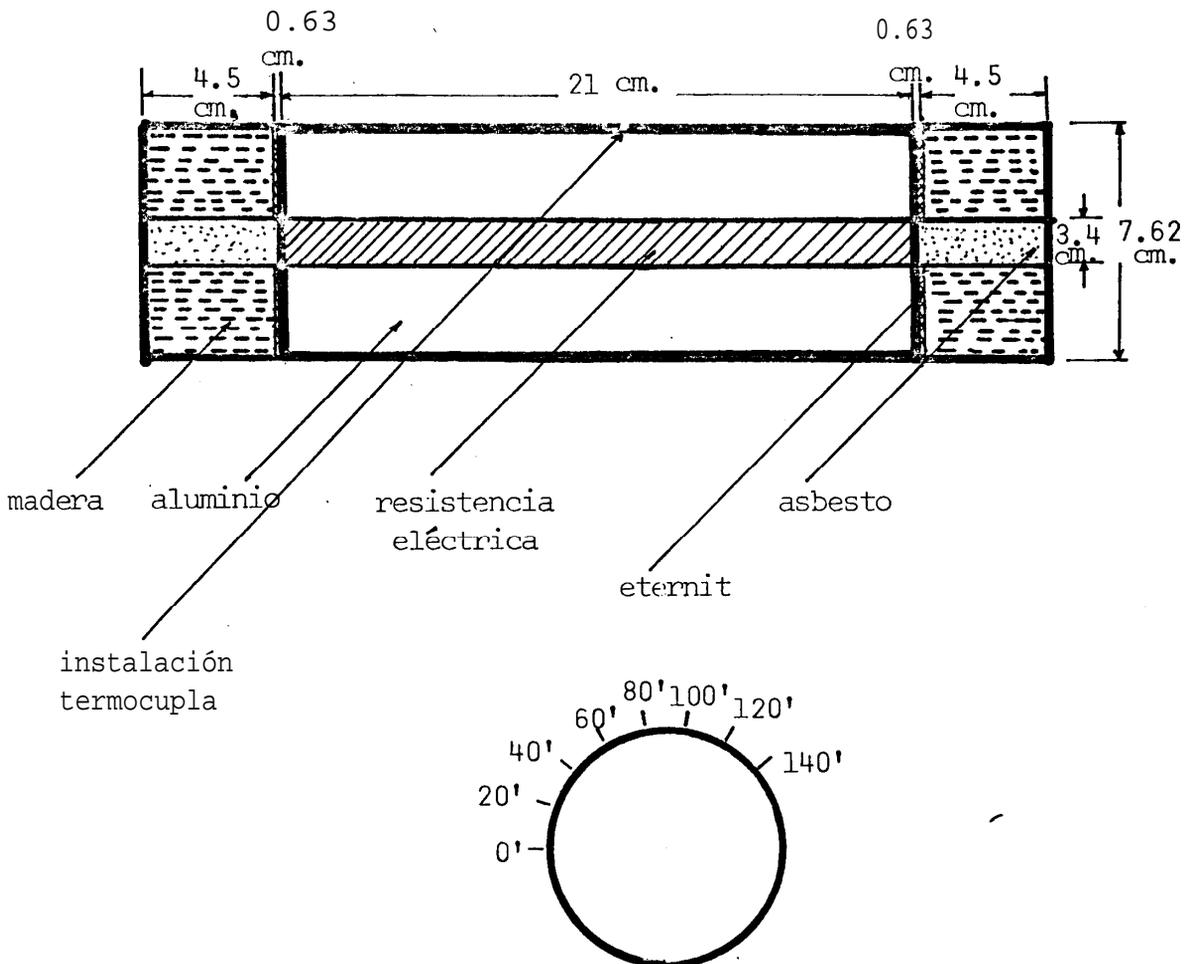


FIGURA 9.- MODELO TERMICO  
CILINDRO SIMPLE

#### 4. - DUCTOS CIRCULARES SIMPLES

El flujo de fluídos sobre cuerpos sumergidos en ellos cuando éstos efectúan intercambio de energía térmica son de gran importancia práctica, ya que de estos fenómenos dependemos o recurrimos a fin de controlar o aprovecharlos para el bienestar del hombre.

Los casos correspondientes a fenómenos de transferencia de calor en tre ductos circulares y fluídos corresponden a un área de vital im portancia para el diseño de intercambiadores de calor.

##### 4.1 Análisis Teórico

En el campo estrictamente fluídico, es un parámetro importante la fuerza actuante sobre el cuerpo sumergido ya que ésta nos expresa el resultado de los efectos producidos por la pre sión y los esfuerzos de corte presentes debido al flujo.

$$\vec{F} = \iint_{SC} d\vec{F}_{\text{corte}} + \iint_{SC} d\vec{F}_{\text{presión}}$$

•• □ superficie del cuerpo

La componente de esta fuerza en la dirección del flujo se la denomina fuerza de arrastre.

Si observamos el flujo de un fluído alrededor de un cilindro en posición axialmente normal, podemos apreciar que sus dis tribuciones de presión estática y velocidad varían a medida que este flujo avanza sobre el cuerpo. Existe un punto deno minado de estancamiento; por cuanto su velocidad es cero, y toda su energía se transforma en forma de presión, es decir presión máxima, punto A. Luego, como el fluído debe ascender sobre el cuerpo, requiere transformar parte de la energía de

presión en cinética hasta que llega a un punto B; donde su presión es mínima y la velocidad es máxima, hasta aquí, teóricamente, el fenómeno es continuo. En la parte posterior debe producirse un fenómeno inverso a la anterior, es decir reducir su velocidad a incrementar la presión. Esto sería ideal, más en la realidad aquel fenómeno puede generarse hasta que su presión es suficiente para mantener el movimiento hacia adelante. Como es lógico deducir, cada vez nos encontramos con una presión adversa mayor. El flujo será continuo hasta que la presión del flujo con la adversa se equilibre, para luego separarse en la superficie. En la parte posterior a este punto de separación tendremos un flujo adverso, constituido por vórtices, debido a la presión adversa, contrario a lo que sucedió en la parte frontal, constituyéndose en un flujo diferente, es decir una discontinuidad; razón por la cual el fenómeno

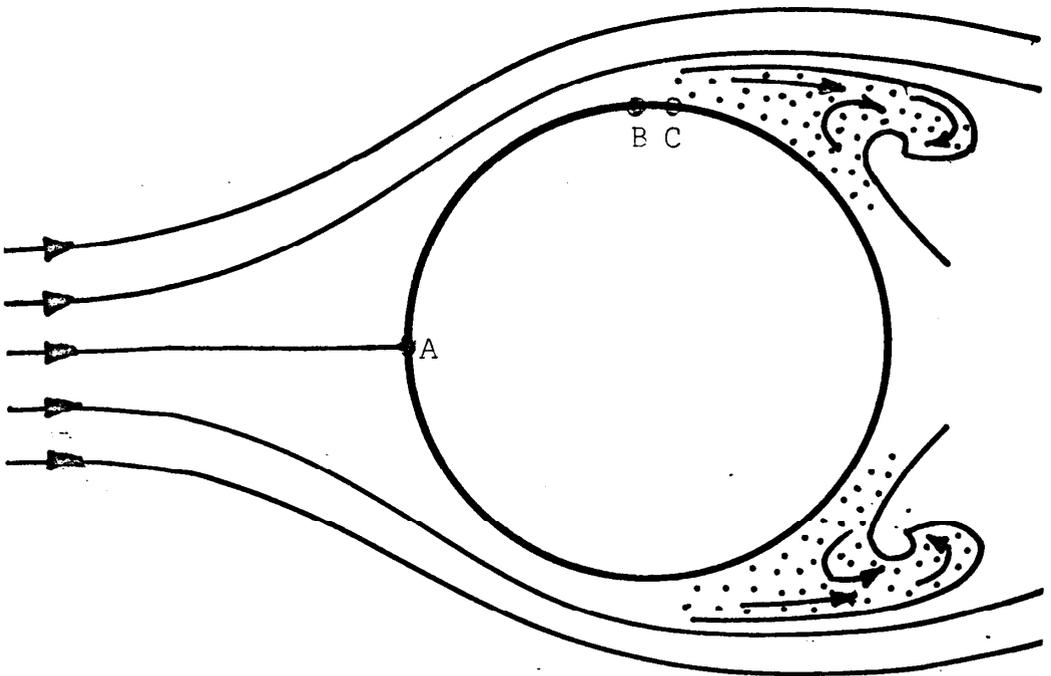


Figura 10.- FLUJO ALREDEDOR DE UN CILINDRO

meno no puede ser estudiado analíticamente en su totalidad. El punto de separación, C, depende principalmente del tipo de flujo y de la rugosidad de la superficie. <sup>(7)</sup>

Todo ésto puede ser observado cuantitativamente en la figura 10.

Lo anteriormente analizado corresponde a la zona del flujo cerca de la superficie. De la figura 11, observamos que no es otra cosa que la capa límite, es decir; La zona del flujo donde los efectos viscosos se encuentran presentes. Por lo tanto, podríamos indicar que es la capa límite la que se separa de la superficie.

La separación de la capa límite y la formación de vórtices en la parte posterior del cilindro, denominado estela de remoli-

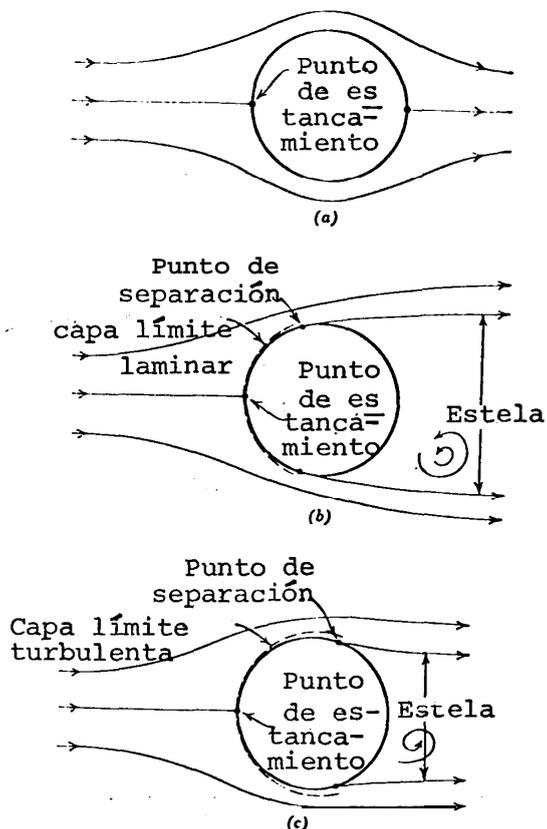


FIGURA 11.- FLUJOS ALREDEDOR DE UN CILINDRO MOSTRANDO DIFERENTES PUNTOS DE SEPARACION

nos, se producirá siempre en los flujos sobre cilindros, excep  
tuándose para flujos de Reynolds muy bajos como  $Re < 10$ . Esta  
separación y estela genera la distribución de presiones mos -  
t-rada para diferentes Reynolds en la Fig. 12. <sup>(7)</sup>

En la figura 12 se observa la similitud de la distribución de  
presiones tanto para el flujo ideal como real en la parte fron  
tal del cilindro; anterior al punto de separación. En la par  
te posterior estas distribuciones difieren mucho.

Veamos los cambios de los flujos sobre cilindros largos para  
diferentes números de Reynolds. Para ésto observamos la figu  
ra 13.

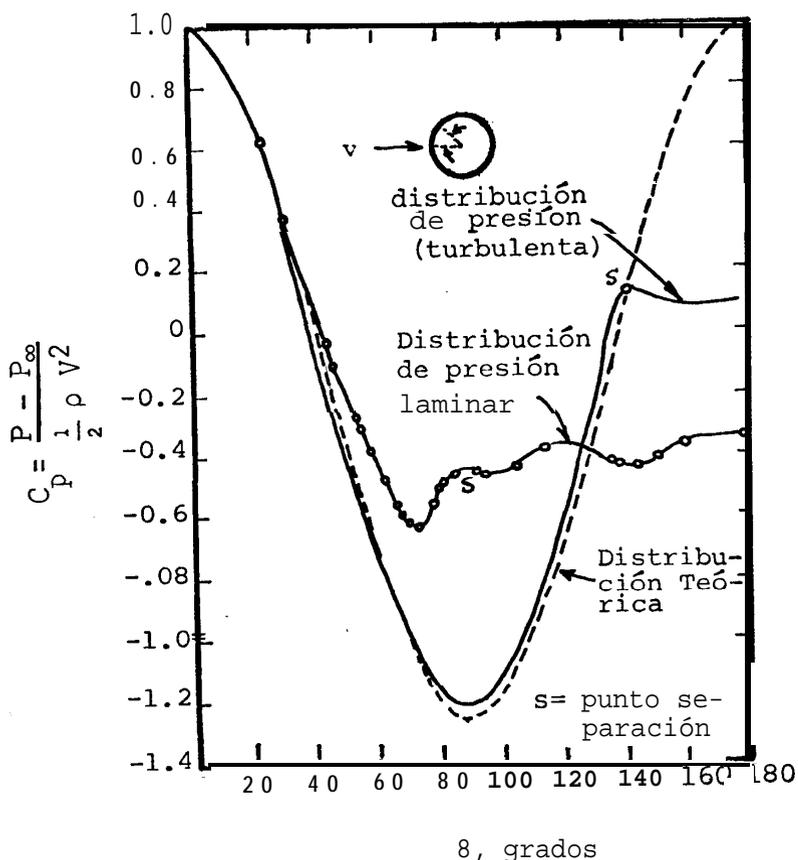


Fig. 12.- DISTRIBUCION DE PRESION  
DEL FLUJO ALREDEDOR DE  
UN CILINDRO

Observamos que para los diferentes Reynolds, los comportamientos son distintos. Esto puede expresarse en la forma siguiente: <sup>(8)</sup>

- a)  $Re < 1.0$ .- El flujo se adhiere a la superficie, el arrastre se debe solamente a la fricción por cuanto la distribución de presiones es simétrica ya que no hay separación.
- b)  $Re \approx 10$  .- Observamos una zona de discontinuidad del flujo con formación de débiles vórtices, presentándose arrastre por presión además del de la fricción.
- c)  $Re \approx 100$ .- Los vórtices se separan de la superficie posterior al cilindro. La fuerza de arrastre debido a la presión predomina a la de fricción.
- d)  $10^4 < Re < 10^5$ .- Las fuerzas inerciales son altas y las viscosas casi despreciables. Por lo tanto la fuerza de arrastre es casi enteramente debido a la presión, es decir; efectos de fricción despreciables.
- e)  $Re > 10^5$ .- El flujo de la capa límite se convierte de laminar en la parte frontal a turbulento en cierta parte de la zona posterior, moviendo el punto de separación hacia más atrás. La energía cinética del flujo hace que éste pueda penetrar en la zona de vórtices y reduzca la magnitud de ésta, disminuyendo la fuerza de arrastre.

A pesar de la complejidad del flujo, como ha sido discutido al analizar su heterogéneo comportamiento, éste provee grandes ventajas en la transferencia de calor, ya que las partículas del fluido se convierten en agentes transportadores de energía.

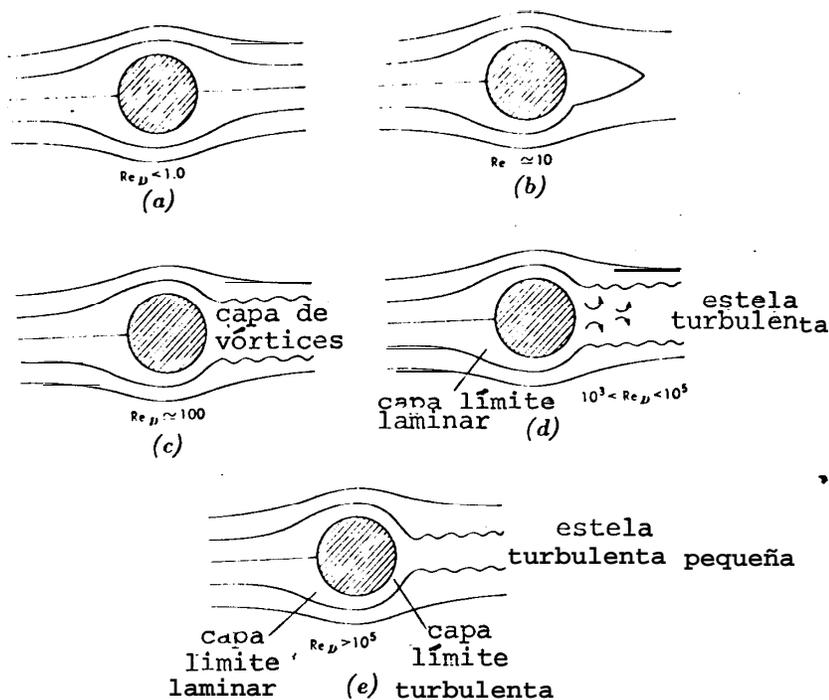


FIGURA 13.- ESQUEMAS ILUSTRATIVOS DEL PATRÓN DE  
 -- FLUJO NORMAL A UN CILINDRO

El rango de operación del trabajo experimental de la presente tesis está alrededor de  $10^4 < Re \leq 10^5$ , por lo tanto es importante establecer los efectos que la constitución del flujo afectará a la transferencia de calor.

Para  $Re < 10^4$ , el punto de separación se encuentra, para ductos largos, aproximadamente a  $80^\circ$  y la transferencia de calor, de  $0^\circ$  a  $80^\circ$ , se reduce debido al crecimiento de la capa límite laminar hasta un mínimo que corresponde al punto de separación. Posterior al punto de separación la transmisión de calor incrementa debido a la considerable turbulencia existen

te en la parte posterior del cilindro, aunque no en la magnitud de la parte frontal porque los vórtices recirculan en esta zona.

Para el rango  $Re > 10^5$ , existe transición de flujo laminar a turbulento en la capa límite sin separación en la zona laminar. La transmisión de calor sobre cilindros bajo esta condición tiene dos mínimos. El primer mínimo corresponde al punto de transición, donde la reducción de la transferencia de calor, debido al crecimiento de la capa límite laminar, se detiene y comienza a incrementarse debido al intercambio de cantidad de movimiento de la capa límite turbulenta que hace a las partículas del flujo mejores agentes de transporte de energía. Luego la transferencia de calor aumenta debido a la transición de la capa límite laminar a turbulenta, alcanzando un máximo cuando la capa límite es completamente turbulenta. Posteriormente, la transferencia de calor disminuye, por cuanto las partículas tienen menos capacidad de absorción de energía, llegando a un segundo mínimo donde la capa límite turbulenta se separa, esto sucede a un ángulo aproximado de  $130^\circ$ . Luego la transferencia de calor incrementa debido a las mismas razones expuestas para el rango anterior de  $Re$ .

## 4.2 Experimentación

### 4.2.1 Fuerza de arrastre

Para la prueba experimental del arrastre se confeccionó un modelo de aluminio que consiste en un cilindro sólido de diámetro igual a 3,50 centímetros el mismo que fue instalado en el dinamómetro del túnel de viento.

Procedimiento experimental

1. Se instala el modelo sobre el dinamómetro del túnel de viento.

2. Se calibra en la cabina de control el valor de la presión dinámica a un valor de cero para ausencia de flujo.
3. Se calibra en el dinamómetro; el coeficiente de arrastre a un valor cero para ausencia de flujo.
4. Se conecta el ventilador del túnel de viento y se regula la presión dinámica en base a un tornillo sin fin, de acuerdo al número de Reynolds deseado, es decir el flujo de aire requerido.
5. Control de estabilización del flujo.
6. Toma de datos periódicos del valor de la fuerza de arrastre para un mismo flujo de aire y de la temperatura ambiente.
7. Repetición del procedimiento (1-5) para otros flujos.

Con los valores de la fuerza de arrastre establecida experimentalmente se calcularon los valores correspondientes al coeficiente de arrastre en base a su relación, que por definición es:

$$C_D \equiv \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

Estos valores se encuentran presentados en la Tabla A, el mismo que es comparado a resultados de trabajos previos. El procedimiento de cálculo se encuentra detallado en el Apéndice; cálculos efectuados, y los valores pueden ser observados en el gráfico 1.

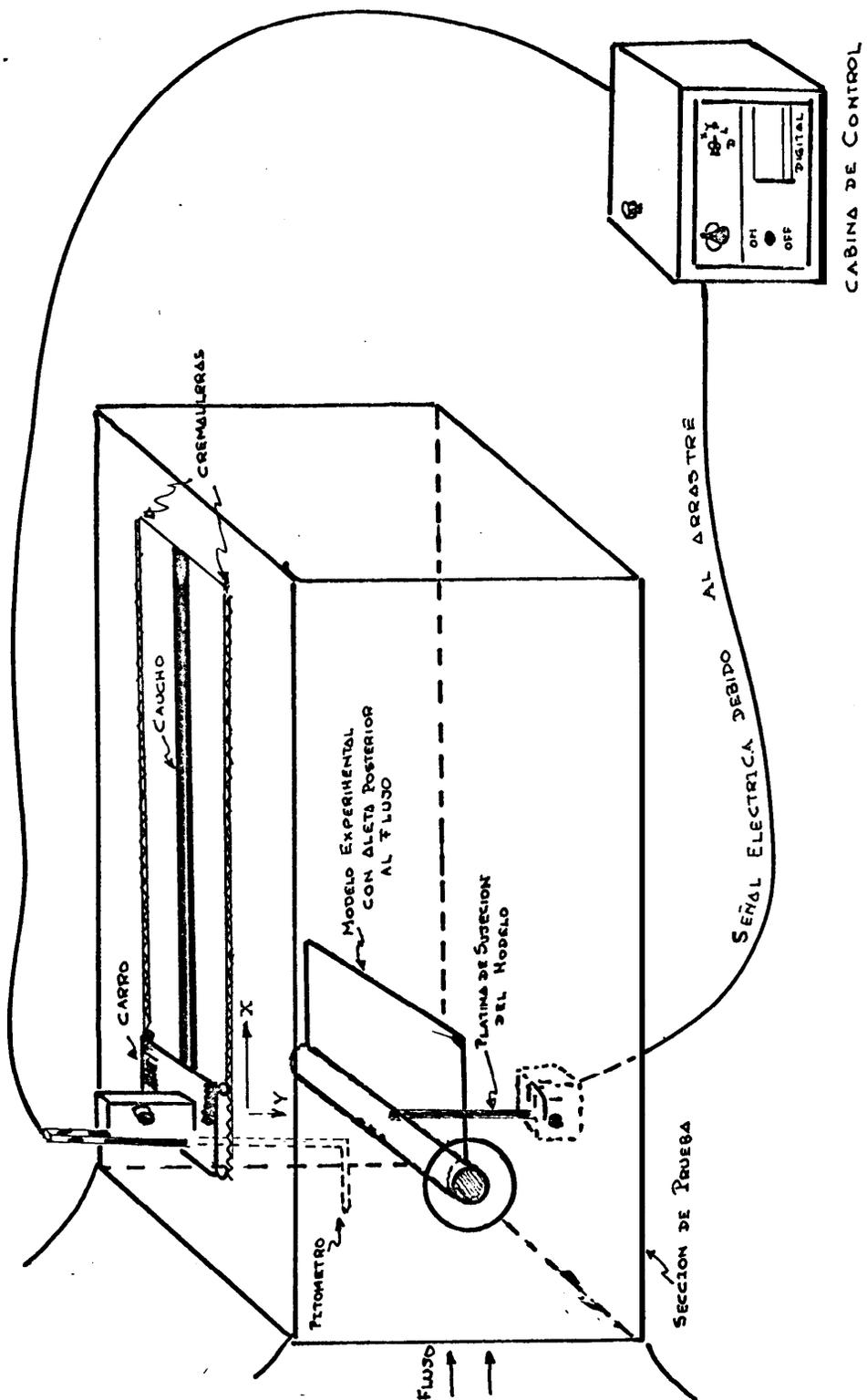


FIGURA 14.- INSTALACION EXPERIMENTAL PARA LA FUERZA DE ARRASTRE

#### 4.2.2 Número de Nusselt

En la Figura 15 puede observarse los efectos de la con  
vección y la importancia de la velocidad del flujo.

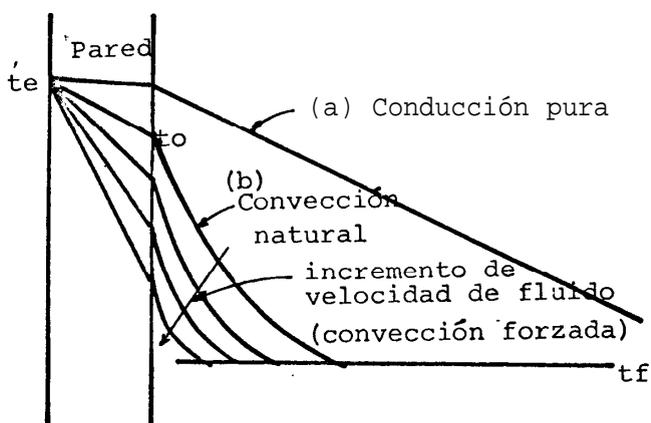


Figura 15 .- LOS EFECTOS DE LA CONVECCION

Para la determinación del número de Nusselt se constru  
yó un cilindro sólido de 7,62 cms (3") de diámetro, es  
decir mayor al correspondiente al modelo fluídico.

La razón principal para ésto fue la necesidad de la ins  
talación de una resistencia eléctrica axialmente simé-

trico al cilindro, cuyo diámetro es de 3 cms. Además, la instalación de las termocuplas sobre la superficie del cilindro exige que éste tenga un espesor apreciable para evitar que el flujo radial uniforme de calor sea distorsionado.

La prueba experimental presente requiere los siguientes elementos:

- a. El modelo con su fuente generadora de calor y la instalación de las termocuplas en los puntos cuyas temperaturas se requieren conocer.
- b. La fuente generadora de calor, para lo cual se utilizó una resistencia eléctrica axialmente simétrica al cilindro, cuyas características son: 200 w, y  $80 \Omega$ .
- c. Un variador de voltaje, VARIAC, para proveer diferentes flujos eléctricos; diferentes flujos de calor.
- d. Dos multímetros para la lectura del voltaje y amperaje suministrado a la resistencia eléctrica.
- e. Un termómetro instalado a la entrada del túnel para establecer la temperatura del aire del flujo libre.
- f. Un potenciómetro para la lectura de las fuerzas electromotrices generadas por las termocuplas, con los consiguientes valores de temperatura.
- g. La fuente generadora del flujo de aire; en este caso el túnel de viento con sus correspondientes accesorios.

## Procedimiento experimental

1. Montaje del modelo con sus correspondientes termocuplas instaladas.
2. Chequeo de la instalación de las termocuplas para ausencia de flujo fluídico y eléctrico, es decir generación de fuerza electromotriz a cero.
3. Chequeo de que la fuente generadora de calor provee un flujo térmico uniforme en la dirección radial. Prueba realizada con suministro de energía eléctrica pero con ausencia de flujo de aire.
4. Instalación del modelo en el túnel de viento y calibración de la lectura de la presión dinámica a un valor cero para ausencia de flujo.
5. Poner en funcionamiento el ventilador del túnel de viento y regular la presión dinámica para el número de Reynolds requerido.
6. Conectar el suministro de energía eléctrica mediante el variador de voltaje.
7. Controlar el flujo eléctrico, en base a las lecturas presentadas en los multímetros digitales instalados, debido a la variación de voltaje del suministro eléctrico en Guayaquil.
8. Controlar la obtención del estado estable mediante tomas periódicas de las caídas de voltaje producidas por las termocuplas en el potenciómetro.
9. Una vez obtenida la condición de estado estable, hacer varias tomas de lectura en el potenciómetro a fin de lograr un valor promedio de lecturas.

10. Repetir la prueba (desde 1 a 9) para otros flujos de electricidad y aire.

La instalación experimental de esta prueba puede ser observada en la figura 16, donde hemos incluido una sección de prueba de madera, confeccionada para este trabajo, evitando posibles efectos sobre la sección original de prueba del túnel de viento al operar con flujos térmicos.

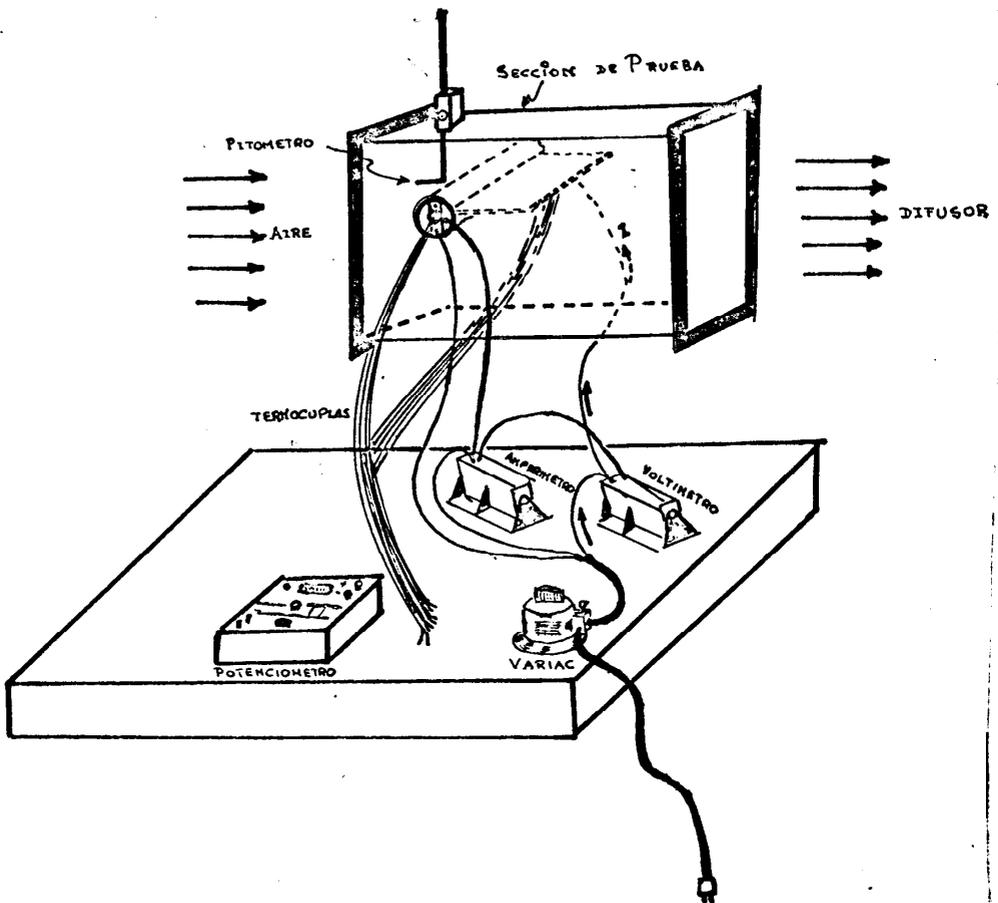


FIGURA 16.-- INSTALACION EXPERIMENTAL TERMICA

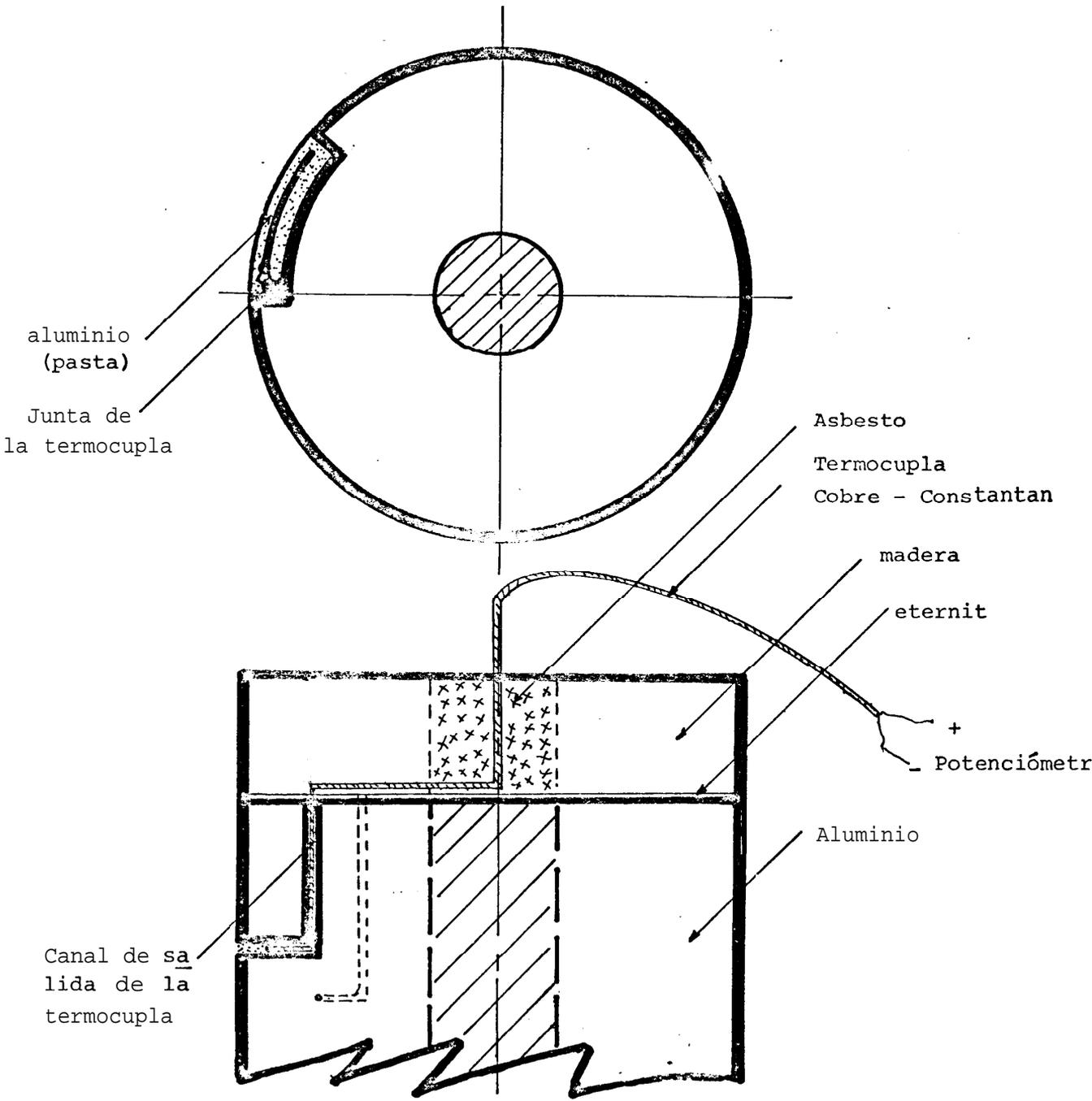


Fig. 17.- INSTAIACION DE IA TERMOCUPLA

Las datos obtenidos en cada prueba experimental. son utilizados para la determinación de los números de Nusselt locales y promedio, cuyos resultados se encuentran registrados en la Tabla C y gráficos 3 y 4. Estos resultados no han podido ser comparados con trabajos previos por cuanto los existentes corresponden a ductos largos, los mismos que no es posible instalarlos debido a la pequeña sección de prueba de nuestro túnel de viento, y a la exigencia de un gran diámetro para la coloca-ción de las termocuplas requeridas. Sin embargo, la variación de la configuración de las curvas obtenidas cumplen una apreciable similitud con respecto a la correspondiente. a ductos largos.

Los números de Nusselt promedio fueron calculados y situados en la curva experimental reproducida en Analysis of Heat and Mass Transfer por Eckert, <sup>(2)</sup> gráfico 10.

## 5.- DUCTOS CIRCULARES CON ALETA RECTANGULAR AXIAL

La razón fundamental del presente trabajo, como se indica en el Capítulo 2, es investigar el comportamiento de un cilindro sólido con una aleta rectangular posterior y axial, con fuente de calor en su centro axial y sumergida en un flujo de aire.

Podemos establecer que para un flujo de fluido alrededor de un cilindro simple con aleta, la fuerza de arrastre es función de la velocidad del flujo,  $V$ , diámetro del cilindro,  $d$ , densidad y viscosidad del fluido,  $\rho$  y  $\mu$ , respectivamente, y de la longitud de la aleta,  $\ell$ , es decir: (7)

$$F_D = f(v, d, \rho, \mu, \ell)$$

Desarrollando un análisis dimensional podemos encontrar ciertas relaciones adimensionales que nos indicarían los parámetros de variación en nuestro estudio. Estableciendo las dimensiones de estas variables en función de las básicas podemos indicar lo siguiente:

$$\begin{array}{l} v \quad | \quad L/T \quad | \\ d \quad | \quad L \quad | \\ \rho \quad | \quad ML^{-3} \quad | \\ \mu \quad | \quad ML^{-1}T^{-1} \quad | \\ \ell \quad | \quad L \quad | \\ F_D \quad | \quad MLT^{-2} \quad | \end{array}$$

Aplicando el Teorema  $\pi$  de Buckingham, tomamos parámetros, que se repiten en el procedimiento, como variables básicas existen  $(M, L, T)$ , los mismos que son  $V$ ,  $d$  y  $\rho$ . Luego, procedemos con el cálculo, combinando los parámetros seleccionados como fijos con cada uno de los restantes a fin de constituir los parámetros adimensionales.

$$\begin{array}{l} \Pi_1 = \rho^a v^b d^c F_D \\ M^0 L^0 T^0 = | ML^{-3} |^a | LT^{-1} |^b | L |^c | MLT^{-2} | \end{array}$$

De donde:

$$a = -1$$

$$b = -2$$

$$c = -2$$

Por lo tanto'

$$\Pi_1 = \frac{F_D}{\rho v^2 d^2} = 2C_D$$

donde  $C_D$  es el coeficiente de arrastre.

$$\Pi_2 = \rho^a v^b d^c \mu$$

$$M^0 L^0 T^0 = (ML^{-3})^a (LT^{-1})^b (L)^c (ML^{-1}T^{-1})$$

de donde:

$$a = -1$$

$$b = -1$$

$$c = -1$$

Por lo tanto

$$\Pi_2 = \frac{\mu}{\rho v d} = \frac{1}{Re}$$

donde  $Re =$  Número de Reynolds.

Finalmente, tomamos la variable restante:

$$\Pi_3 = \rho^a v^b d^c \ell$$

$$M^0 L^0 T^0 = (ML^{-3})^a (LT^{-1})^b (L)^c (L)$$

resolviendo;

$$a = 0$$

$$b = 0$$

$$c = -1$$

Por lo tanto

$$\Pi_3 = \frac{\ell}{d} = X$$

Donde  $X$  es la longitud relativa de la aleta con respecto al diámetro del cilindro.

Como el Teorema  $\pi$  de Buckingham expresa que cualquier función puede ser expresada en función de sus parámetros adimensionales, podemos escribir lo siguiente:

$$F_D = f(v, d, \rho, \mu, \ell)$$

$$\text{ó } g(F_D, v, d, \rho, \mu, \ell) = 0$$

$$\text{ó } G(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0$$

Es-decir que,

$$G(C_D, Re, X) = 0$$

Por lo tanto

$$C_D = f_1(Re, X)$$

De esta forma notaremos en nuestro experimento que el coeficiente de arrastre será en función del número de Reynolds, de la longitud relativa de la aleta con respecto al diámetro. Para el caso del cilindro simple,  $X = 0$ ,  $C_D = f_1'(Re)$ .

Para la prueba correspondiente a la transferencia de energía térmica tendremos, de igual manera, que este fenómeno de flujo de calor dependerá de ciertas condiciones físicas, ~~como el caso anterior.~~ / Para ello analizaremos la transferencia de calor entre la superficie de un sólido y de un fluido, es decir

$$Q = h A (T_o - T_\infty)$$

Como la transferencia en la superficie es por conducción, tenemos

$$Q = -KA \frac{\partial (T-T_\infty)}{\partial y} \Big|_{y=0}$$

Como estas dos ecuaciones deben ser iguales

$$h (T_o - T_\infty) = -K \frac{\partial}{\partial y} (T - T_o) \Big|_{y=0}$$

luego

$$\frac{h}{K} = \frac{\frac{\partial}{\partial y} (T_o - T) \Big|_{y=0}}{T_o - T_\infty}$$

Si multiplicamos ambos miembros por el diámetro,  $d$ , tenemos:

$$\frac{hd}{K} = \frac{\frac{\partial}{\partial y} (T_o - T) \Big|_{y=0}}{\frac{T_o - T_\infty}{d}}$$

El término de la derecha es la razón del gradiente de temperatura en la superficie con respecto al gradiente de temperatura total. (6)

El término de la izquierda es adimensional y se lo conoce como el número de Nusselt,  $Nu$ , el mismo que sería nuestro valor  $\pi_4$ .

Por lo anteriormente analizado podemos concluir que; al combinar un fenómeno de flujo de fluido con el de transferencia de calor tenemos con 0 parámetros adimensionales, además del encontrado, todos aquellos cuyas variables influyen en el fenómeno de convección forzada, es decir;  $V, \mu, \rho, d, \ell$ . Por lo tanto debemos incluir  $\pi_2$  y  $\pi_3$ .

$$\phi (\pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0$$

$$0 \text{ sea } \phi (Re, X, Nu) = 0$$

De donde podemos concluir que

$$Nu = f_2 (Re, X)$$

Si eliminamos la aleta encontramos que

$$Nu = f'_2 (Re)$$

De los análisis desarrollados observamos que los procedimientos teóricos nos conducen al establecimiento de parámetros adimensionales que nos orientan en las pruebas experimentales. Debido a la complejidad del fenómeno por su discontinuidad no existen estudios completamente analíticos y siempre éstos deben complementarse con pruebas experimentales.

## 5.1 Experimentación

### 5.1.1 Fuerza de arrastre

El arrastre, como fue indicado en la sección 4, depende de la presión y los esfuerzos de corte que actúan sobre la superficie del cuerpo. Por lo tanto, si instalamos un cuerpo en la zona de discontinuidad, donde se desarrollan los vórtices, incrementaremos el arrastre por los esfuerzos de corte (fricción) debido al incremento de superficie, pero éstos son menores que los producidos por la presión adversa generada en los vórtices, razón por la cual se logra la reducción del arrastre, denominándose a éstos cuerpos de configuración aerodinámica o aeroforme.

Para el trabajo experimental tomamos como superficie anexa o extendida a la placa rectangular de sección constante, por ser ésta de fácil maquinado y de mayor aplicación práctica. El procedimiento experimental es similar al del cilindro simple, con la única diferencia que se refiere al montaje de la aleta de longitud seleccionada para cada prueba. Los resultados experimentales se presentan en la Tabla B y en el gráfico 2.

### 5.1.2 Número de Nusselt

Dentro del análisis teórico de la transferencia de calor encontramos a la aleta como un elemento altamente disipante de energía térmica desde una superficie cualquiera. Para esto procedemos a un breve análisis.

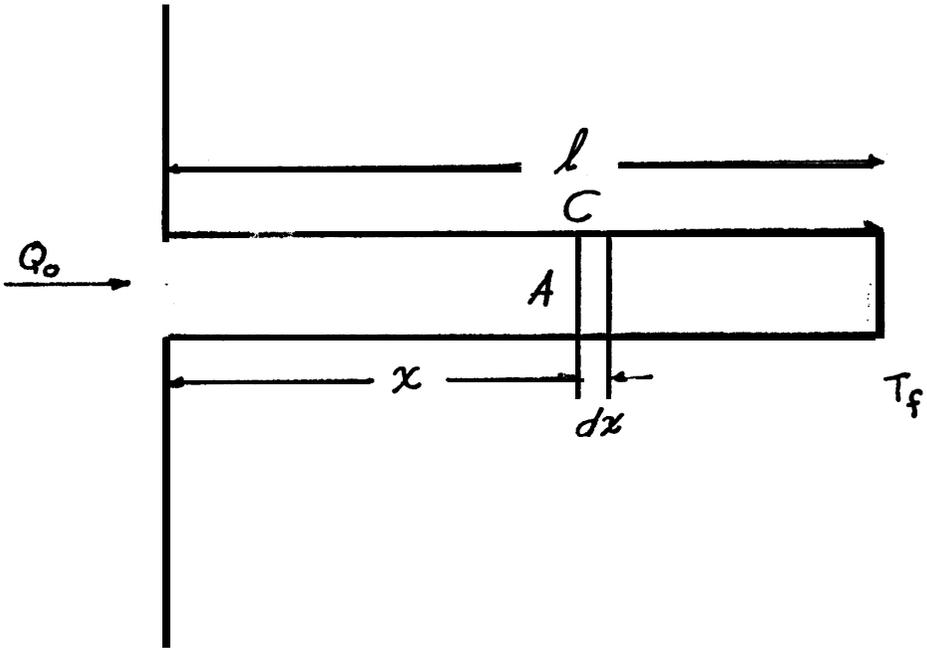


FIGURA 18.- ALETA RECTANGULAR COMO ELEMENTO DISIPANTE DE CALOR

La ecuación general de transferencia de calor por conducción para un material isotrópico y homogéneo está dado por: <sup>(2)</sup>

$$\frac{T}{a-r} = \frac{K}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q'}{PC}$$

Como la longitud de la placa es larga y su espesor delgado comparado con el elemento cilíndrico, podemos considerar al flujo de calor como unidimensional. Si nuestras medidas experimentales se llevan a efecto para condiciones de estable, la ecuación arriba indicada puede reducirse a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{Q'}{K}$$

Como  $Q'$  va a ser disipado por convección, podemos escribir

$$Q' = hC \, dx (T - T_f)$$

Donde  $Q'$  es el calor por unidad de volumen, y se asume un coeficiente filmico constante sobre la superficie cuando no existe gradiente de temperatura en la dirección normal a la placa debido a su espesor pequeño.

Por lo tanto:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{hC \, dx (T - T_f)}{KA \, dx}$$

Si llamamos  $\psi = T - T_f$ ;  $d\psi = dT$  luego:

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} - \frac{hC}{KA} \psi = 0$$

Resolviendo esta ecuación tenemos que

$$\psi = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}$$

donde

$$m = \sqrt{\frac{hC}{KA}}$$

Las constantes  $C_1$  y  $C_2$  pueden ser evaluadas aplicando las condiciones de borde correspondientes.

$$x = 0 \quad T = T_0$$

$$x = l \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$$

Por cuanto la aleta transfiere calor a sus alrededores y las pérdidas de energía al final de la aleta se consideran cero.

Aplicando las condiciones de borde tenemos:

$$\psi_0 = T_0 - T_f = C_1 + C_2$$

$$\left( \frac{d\psi}{dx} \right)_{x=l} = 0 = m C_1 e^{ml} - m C_2 e^{-ml}$$

luego:

$$\frac{\psi}{\psi_0} = \frac{e^{m(l+x)} + e^{-m(l-x)}}{e^{ml} + e^{-ml}} = \frac{\cosh m(l-x)}{\cosh ml}$$

Como el flujo de calor en la base de la aleta ( $x=0$ ) es:

$$Q_0 = -KA \left( \frac{d\psi}{dx} \right)_{x=0} = mKA \psi_0 \left| \frac{\sinh m(l-x)}{\cosh ml} \right|_{x=0}$$

$$Q_0 = h C K A \psi_0 \tanh ml ; \quad m = \sqrt{\frac{hC}{KA}}$$

Como el flujo térmico  $Q_0$  es función directa de  $\tanh(ml)$ , luego la disipación de calor dependerá de la variación de esta función. Esta variación de  $Q_0$  incrementará a medida que  $l$  aumenta, pero este incremento se reduce cada vez hasta alcanzar un valor asintótico, es decir que existe una longitud óptima.

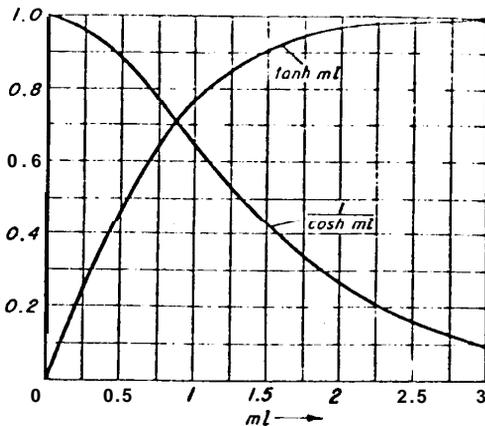


FIGURA 19 - VARIACION DE  $\tanh(ml)$

De lo anteriormente analizado se observa que teóricamente puede establecerse la longitud Óptima de aleta; ésto en la práctica requiere del conocimiento de la temperatura de la superficie en la base de la aleta, la misma que depende de los flujos de aire y eléctricos. Esto sería interesante para un próximo trabajo, ya que ésto exigiría una gran variación de los parámetros indicados.

En este trabajo nos dedicaremos a operar con diferentes longitudes de aleta, a fin de investigar su incremento de transferencia de calor con la consiguiente disminución de arrastre.

~~El procedimiento experimental es el mismo que el detallado en la sección 4.2.2, para el cilindro simple. Los valores de los datos obtenidos son presentados en la tabla D y los gráficos 5, 6, 7, 8, 9, 10.~~

## 6.- COMPARACION DE RESULTADOS

Al inicio del presente trabajo se estableció como objetivo el análisis experimental del cilindro con la placa rectangular axialmente integrada, esperándose encontrar que se produzca una reducción de arrastre y un incremento del Número de Nusselt, es decir: del flujo de calor. Veamos ésto a continuación.

### 6.1 Cilindro Simple versus Cilindro con Aleta Rectangular Axial

#### 6.1.1 Arrastre

Efectuando un análisis de los resultados obtenidos para el arrastre, tanto de un cilindro simple como con la placa integrada, podemos observar que la reducción del coeficiente de arrastre incrementa a medida que la longitud de la placa aumenta.

Cuando la aleta tuvo una longitud relativa  $X$  mayor que 2, pudo observarse dificultad en la lectura de la fuerza de arrastre por cuanto su valor era muy variable. Esto se atribuye a que los vórtices remanentes actuaban sobre la placa generando oscilaciones y produciendo la consiguiente vibración del modelo.

Una observación significativa puede ser apreciada en el gráfico No. 1.

#### 6.1.2 Número de Nusselt

Los datos obtenidos de las mediciones experimentales de muestran un incremento apreciable de la transferencia de calor; especialmente en la parte-posterior del cilindro.

Además, podemos observar que a medida que el número de Reynolds aumenta ésta diferencia es más significativa.

Los resultados comparativos pueden ser observados en los gráficos 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

Observando estos resultados encontramos una alta disipación de calor para  $X = 2.0$ , cuando  $Re > 1 \times 10^5$ . Para  $Re < 10^5$ , el cilindro con  $X = 3,0$  se encuentra como el más efectivo.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después ~~de haber~~ hecho los análisis correspondientes, tanto teóricos como experimentales, podemos establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- a. El incremento de superficie sobre cuerpos, ocupando la zona de la formación de vórtices, reduce la fuerza de arrastre.
- b. La aleta es un elemento de gran capacidad disipante de energía térmica cuando ésta se encuentra en un medio fluídico con movimiento relativo.
- c. La colocación de una aleta rectangular en dirección axial y posición posterior del cilindro sumergido en flujo normal a su superficie reduce significativamente la fuerza de arrastre e incrementa el flujo térmico cuando éste tiene diferencia de temperatura con respecto al fluido.
- d. En flujos cuyo  $Re < 10^5$  existe un mínimo que corresponde al punto de separación, a un ángulo  $\theta = 60^\circ$ .
- e. En flujos cuyo  $Re > 10^5$  se presentan dos puntos mínimos para Nu, uno a  $\theta = 60^\circ$  y otro a  $\theta = 120^\circ$ . Estos representan al punto de transición y el punto de separación de la capa límite turbulenta.
- f. Para  $Re > 10^5$ ; el cilindro con  $X = 2,0$  es el elemento de mayor disipación. Esto indica que la longitud óptima de la aleta es tá alrededor de  $X = 2.0$  para este rango de Re.
- g. Para  $Re < 10^5$ , el cilindro con  $X = 3.0$  es el elemento de mayor disipación considerándose que la longitud óptima de aleta está alrededor de  $X = 3$  para este rango de Reynolds.
- h. Los valores de Nusselt promedio obtenidos son muy útiles para el cálculo de transferencia de calor por convección forzada so

bre ductos de longitud corta.

- i. Se ha elaborado un sistema experimental que colabora y motiva los ensayos de investigación en la ESPOL.
- j. Sería recomendable se investigue la variación del flujo de calor en cilindros debido a las rugosidades de la superficie.
- k. Sería recomendable se investigue la transferencia de calor en ladrillos refractarios fabricados localmente.
- l. Una ampliación de este trabajo puede ser hecha a fin de obtener la longitud Óptima de la aleta.
- m. Se puede desarrollar un estudio térmico del bloque de cemento utilizado en las construcciones locales.

A P E N D I C E

TABLA A

RESULTADOS GENERALES DELARRASTREEN CILINDRO SIMPLE

Re	$C_d$
$1,7 \times 10^4$	0,987
$2,1 \times 10^4$	0,955
$2,4 \times 10^4$	0,884
$2,6 \times 10^4$	0,9
$2,8 \times 10^4$	0,9
$3,4 \times 10^4$	0,89
$3,8 \times 10^4$	0,88
$4,5 \times 10^4$	0,86
$5 \times 10^4$	0,87
$5,6 \times 10^4$	0,86
$7 \times 10^4$	0,85
$8 \times 10^4$	0,83
$9,75 \times 10^4$	0,7