

54  
21



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

## DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN TRANSDUCTOR DE PRESION

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P r e s e n t a :

**FRANCISCO JAVIER GARCIA OSORIO**

Director: DR. JAIME CERVANTES DE GORTARI

Asesor: ING. ALFREDO OLIVARES PONCE

México, D. F.

1985



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.

## I N D I C E

### PRESENTACION

Capítulo 1	Características Generales de funcionamiento del dispositivo	
1.1	Sistema mecánico. . . . .	1
1.2	Sistema de indicadores de deformación. . . . .	3
Capítulo 2	Cálculo de la lana de acero	
2.1	Análisis de deformación y esfuerzo . . . . .	8
2.2	Ecuación de la deflexión: método de energía . . . . .	13
2.3	Valores de los parámetros de diseño . . . . .	17
Capítulo 3	Manufactura y acoplamiento	
3.1	Base de la lana de acero . . . . .	22
3.2	Accesorios del acoplamiento . . . . .	25
Capítulo 4	Indicadores de Deformación* ID	
4.1	Características físicas del ID de hojuela metálica . . . . .	29
4.2	Principio de funcionamiento del ID resistivo . . . . .	31
4.3	Puente de Wheatstone . . . . .	34
4.4	Acoplamiento de los ID al transductor . . . . .	30
Capítulo 5	Características Estáticas	
5.1	Sistema de calibración estática	49
5.2	Calibración estática con un solo ID . . . . .	52
5.3	Calibración estática con cuatro ID . . . . .	54

\* strain gages

## Capítulo 6 Características Dinámicas

6.1	Generalidades . . . . .	69
6.2	Sistemas de 1° y 2° ordenes . . . . .	71
6.3	Identificación de la dinámica del dispositivo-transductor:	
	Entrada-salida del sistema . . . . .	86
	Pruebas de respuesta libre . . . . .	89
	Pruebas de respuesta a un impulso . . . . .	95
	Pruebas de respuesta a una señal sinusoidal . . . . .	100
	CONCLUSIONES . . . . .	105
	BIBLIOGRAFIA . . . . .	108
	APENDICES	
(A)	Análisis experimental de esfuerzos . . . . .	111
(B)	Tipos de Indicadores de Deformación . . . . .	116
	Clasificación de ID de resistencia eléctrica . . . . .	122
	Clasificación de ID de hojuela metálica . . . . .	129
(C)	Colocación de los Indicadores de Deformación . . . . .	135

## CAPITULO 1

### CARACTERISTICAS GENERALES DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO

El diseño del transductor de presión concebido, se basó en la adaptación de indicadores de deformación\* (ID) en un manómetro de carátula con tubo de Bourdon falcado o en forma de "C". Para una mejor comprensión del funcionamiento del dispositivo se le puede considerar formado por dos sistemas, el mecánico y el de los ID.

#### 1.1 Sistema mecánico

La construcción del transductor consistió en colocar una lámina o laminilla de acero que se flexiona debido a un desplazamiento del tubo de Bourdon del manómetro, y el movimiento es proporcional a la presión que se ejerce en el interior de este último. La flexión produce una deformación en la lámina que se detecta a través de indicadores de deformación (ID); en la Fig. 1.1 aparece un diagrama de bloques del dispositivo-transductor. La lámina se apoya libremente en uno de sus extremos sobre la parte final del tubo de Bourdon, el otro extremo está fijo sobre una base que a su vez va unida a la estructura del manómetro. El acoplamiento entre la lámina y su base se realizó con tornillos de latón, y para asegurar un buen ajuste se utilizaron dos pequeñas placas, abajo y arriba de la lámina. La base es una pieza -también de latón- manufacturada esmeradamente, cuya configuración geométrica es la de dos extremos rectangulares dispuestos en ángulo recto. Uno de sus extremos se encuentra soldado con estaño a la parte inferior de la estructura del manómetro de carátula; el otro, soporta a la lámina

\* del inglés strain gages

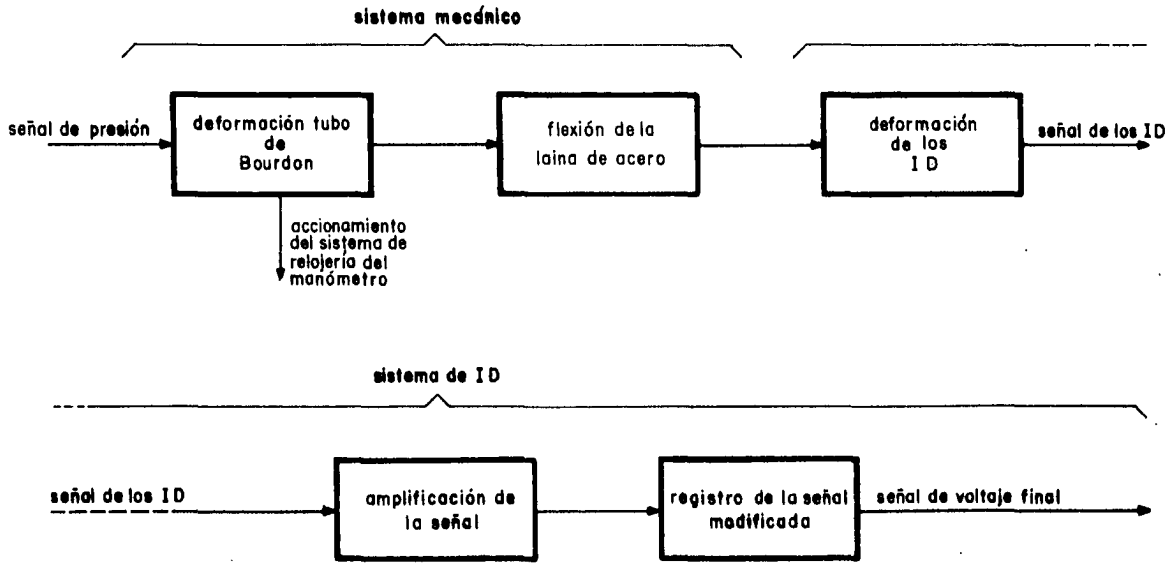


FIG. 1.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL DISPOSITIVO-TRANSDUCTOR

de acero.

Se emplearon dos accesorios más en el sistema: una esferilla metálica y una placa de latón. La primera fué colocada para mantener un solo punto de contacto entre la lana y el tubo de Bourdon; la segunda fué una placa delgada de latón que afianza la escuadra de la base.

El tamaño de la lana de acero (largo, ancho, espesor) se obtuvo bajo condiciones tales que los parámetros de diseño resultaron al tratar la laminilla como una viga en cantiléver, a la cual se le aplica una fuerza sobre su extremo libre.

El sistema tubo de Bourdon-lana de acero-indicadores de deformación constituye un mecanismo que logra una relación directa entre la deformación de la lana de acero y la presión que registra el manómetro de carátula. En la Fig. 1.2 se presenta un arreglo general del sistema dispositivo-transductor y en la Fig. 1.3 una fotografía del mismo.

## 1.2 Sistema de indicadores de deformación

El valor cuantitativo de la deformación de la lana de acero utilizada se conoció con indicadores de deformación o strain gages del tipo de hojuela metálica. Para verificar la linealidad del sistema construido se utilizó solamente un ID (Fig. 1.4); después de considerar satisfactorio el comportamiento, se instalaron cuatro ID sobre la superficie de la lana (Fig. 1.5) todos ellos colocados en el lugar más cercano posible al empotramiento de la lana, donde ocurre el máximo esfuerzo. Se pegaron dos ID en la parte superior de la lana, superficie en la cual las fibras se encuen

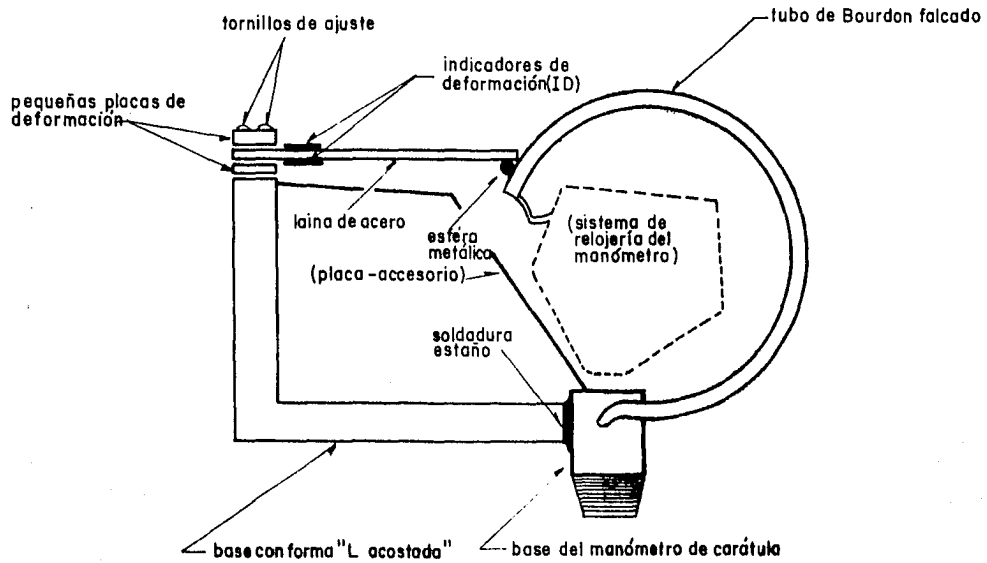


FIG. 1.2 DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL DISPOSITIVO-TRANSDUCTOR



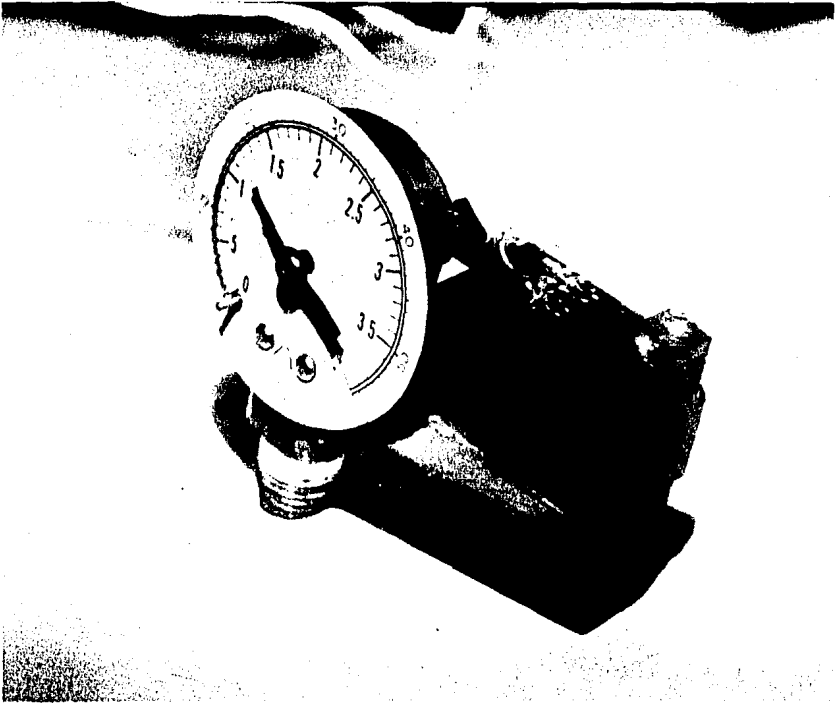


Fig. 1.3 (Fotografía) Dispositivo-Transductor  
Diseñado y construido.

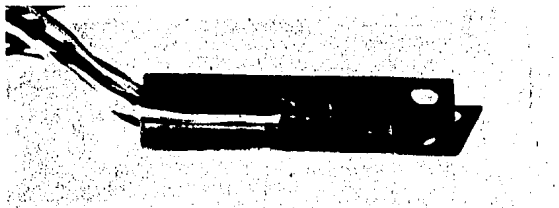


Fig. 1.4 (Fotografía) Laina de acero con un ID

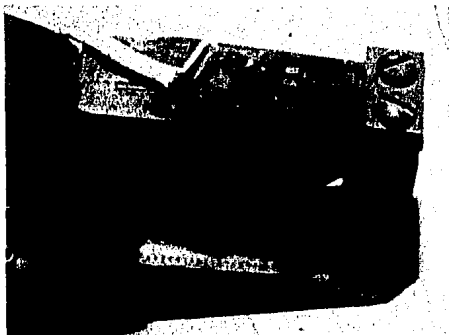


Fig. 1.5 (Fotografía) Laina de acero con 4 ID

tran en compresión cuando la lana se deforma; los otros dos indicadores se colocaron en el revés de la lana de acero, en cuya superficie las fibras se tensionan al presentarse la flexión.

La adhesión de los indicadores de deformación (ID) constituye una técnica que comprende la preparación de la superficie en donde se instalarán los ID -limpieza, pulido, etc.-, el pegamento a utilizar, el protector de los ID, la colocación propia de los ID y el curado o secado de los mismos.

Debido a la fragilidad de los indicadores (ID), su instalación requirió de un trabajo preciso y de cuidado riguroso.

En este capítulo, hasta el momento hemos descrito en términos generales, la manera en que fueron adaptados los indicadores de deformación al manómetro de tubo de Bourdon falcado. Sin embargo, el punto de interés sobresaliente es el que explica el funcionamiento del propio ID.

En este trabajo fueron empleados ID de hojuela metálica ampliamente extendidos en el mercado de dispositivos electrónicos del mundo desarrollado y que al igual que todo los del tipo de resistencia, a través del fenómeno de piezoresistividad transducen una señal física (desplazamiento, presión, etc.) a una señal de voltaje, la cual finalmente se amplifica y se registra. En el capítulo 4 se presenta una descripción específica de los ID de hojuela metálica y en el apéndice B se expone en forma detallada el principio físico de funcionamiento de los ID de resistencia -especialmente se trata al ID de hojuela metálica-, su clasificación y sus características.

## CAPITULO 2

### CALCULO DE LA LAINA DE ACERO

La forma en que se obtuvieron las medidas que la lana o laminilla de acero deberfa tener fue la siguiente:

El extremo apoyado al tubo de Bourdon se desplaza en sentido vertical empujado por el mismo Bourdon, entonces la máxima deformación de la lana se ocasiona en el momento que el tubo de Bourdon logra su mayor deformación. Para el caso del manómetro utilizado en este diseño ese valor es de 3mm, es decir se tienen 3mm de flecha en el extremo apoyado de la lana.

Las especificaciones de la laminilla a definir y/o a calcular fueron longitud, anchura y espesor. La anchura se tomó como parámetro fijo puesto que en el mercado este material se encuentra con un valor estándar de 1/2 pulgada (12.7mm). Se calculó entonces la anchura y longitud necesarias, por medio de un análisis de esfuerzos y deformación.

#### 2.1 Análisis de deformación y esfuerzo en la lana

Considerando que la lana es realmente una viga en cantiléver por estar en uno de sus extremos fija y por el otro apoyada libremente, se puede advertir que los esfuerzos que existen en la viga son los ocasionados por flexión. Las secciones planas de la viga, normales a su eje, permanecen planas después de que la viga se somete a flexión.

Aceptando que la laminilla está formada por fibras o

"filamentos", se considera hay una superficie formada por fibras que no están sujetas a esfuerzos, dicha superficie neutra (Fig. 2.1) y que en nuestro caso por la configuración de la viga, se encuentra a la mitad del espesor de la lana extendiéndose longitudinalmente.

Imaginemos una fibra típica paralela a la superficie neutra localizada a una distancia  $y$  de ella (Fig. 2.2). Cuando ocurra la flexión la fibra se alargará una cantidad  $\Delta u$ , con ello podemos decir que la deformación lineal  $\epsilon_x$  en la fibra será:

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{du}{dx}$$

En una viga sometida a flexión, las deformaciones lineales de sus fibras son directamente proporcionales a sus distancias respectivas a la superficie neutra, lo cual se puede expresar como  $\epsilon_x = by$ , donde  $b$  es una constante, y  $y$  la distancia del punto localizado al eje neutro; en una viga las deformaciones varían linealmente a partir de la superficie neutra.

Puesto que la lana de acero es un material linealmente elástico se cumple para él la ley de Hooke, así:

$$\sigma_x = E \epsilon_x$$

$E$  es el módulo de elasticidad del material.

Por tanto, para esta viga elástica los esfuerzos normales  $\sigma_x$  que resultan de la flexión deberán también variar linealmente en directa proporción a sus distancias respectivas al eje neutro. Analíticamente se expresa como:

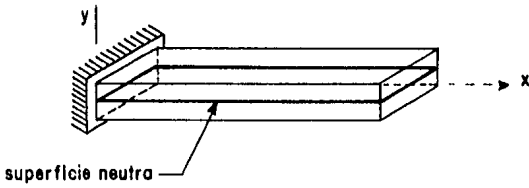


FIG. 2.1 SUPERFICIE NEUTRA EN LA LAINA DE ACERO

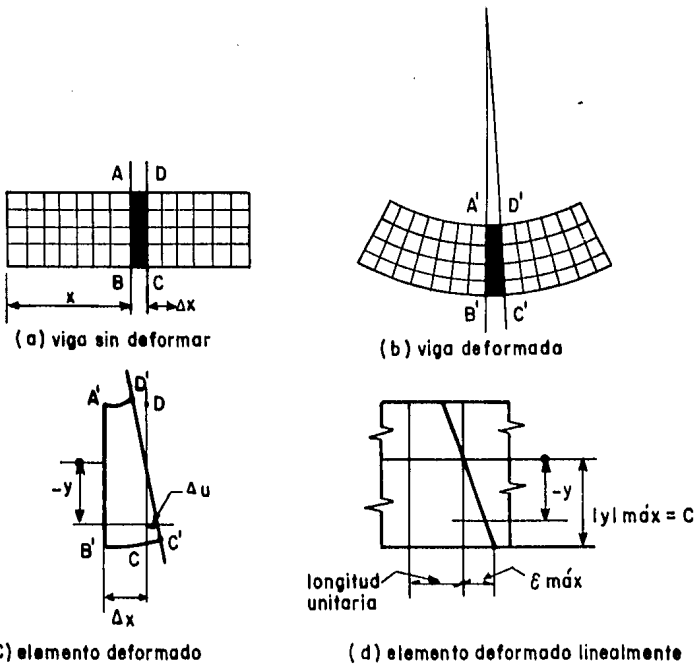


FIG. 2.2 DEFORMACION POR FLEXION (HIPOTESIS) EN LA LAINA O VIGA EN CANTILEVER

$$\sigma_x = By \quad (2.1)$$

B es una constante, y su valor se halla al aplicar dos condiciones de equilibrio para un segmento de viga.

Una primera condición es que la suma de todas las fuerzas horizontales (sobre el eje x) debe ser igual a cero

$$\Sigma F_x = 0 \quad \text{o sea} \quad \int_A \sigma_x dA = 0$$

A es el área transversal de la viga analizada y el subíndice indica que la suma de las fuerzas infinitesimales deberá efectuarse sobre toda el área A.

La anterior ecuación se puede expresar como:

$$\int_A By dA = B \int_A y dA = 0$$

puesto que B no puede ser cero se tiene

$$\int_A y dA = 0$$

La segunda condición de equilibrio es que se deben anular la suma de todos los momentos con respecto al eje z.

$$\Sigma M_z = 0 \quad \text{o sea}$$

$$M + \int (\sigma_x dA) y = 0$$

$\sigma_x dA$  es una fuerza infinitesimal cualquiera y  $y$  es el brazo que utiliza para provocar un momento

En esta última ecuación sustituimos (2.1) y tenemos

$$M = - B \int_A y^2 dA$$

como se puede apreciar la integral depende únicamente de las propiedades geométricas del área transversal; en mecánica se le nombra momento de inercia del área de la sección transversal con respecto al eje centroidal  $\underline{y}$  se mide a partir de tal eje- y se la designa como I.

Entonces, tenemos pues que  $M = - B I$

$$o \quad B = - \frac{M}{I}$$

finalmente al sustituir B en (2.1) se llega a

$$\sigma_x = - \frac{My}{I} \quad (2.2)$$

ecuación llamada fórmula de la flexión elástica para vigas. Y en nuestro caso

$$I = \frac{bh^3}{12} ; \quad \begin{array}{l} b = \text{ancho viga (o lana)} (1.27\text{mm}) \\ h = \text{espesor viga} \end{array}$$

En una sección de la viga M e I son constantes, por ello el esfuerzo normal  $\sigma_x$  alcanza su valor máximo cuando  $\underline{y}$  es máximo (en valor absoluto), se acostumbra designar a  $(y)_{\max}$  la letra C y omitir el signo (-) de la fórmula (2.2), así se tiene:

$$\sigma_{\max} = \frac{MC}{I} \quad (2.3)$$

como estamos calculando el tamaño de la lana de acero para que se deforme en su límite elástico, y no suceda una deforu



mación plástica y mucho menos una fractura, el esfuerzo máximo normal que puede tener nuestro diseño es el esfuerzo máximo permisible especificado para el material, en este caso acero inoxidable.

Un valor útil, obtenido de tablas y que la experiencia confirma adecuado es

$$\sigma_{\max}^* = 4000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

para este esfuerzo, en nuestra ecuación 2.3 se obtienen las incógnitas M, I, C; que se pueden reducir al saber que C aquí tiene un valor igual a la mitad del espesor de la lámina:

$$\sigma_{\max} = \frac{MC}{I} = \frac{M h/2}{\frac{bh^3}{12}}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{6 M}{bh^2} \quad (2.4)$$

y si  $b = 12.7\text{mm}$  como hemos decidido, entonces sólo nos falta conocer M y h.

Requerimos de otra ecuación que nos permita hallar los valores de M y h. Veamos si es la que asocia la deformación y deflexión de una viga por métodos de energía.

Hagamos pues un paréntesis para obtener dicha ecuación.

## 2.2 Ecuación de la deflexión: método de energía

La energía elástica de deformación en un material sólido linealmente elástico se obtiene de la expresión generalizada

\* el esfuerzo máximo permisible

$$u = \frac{1}{2} \iiint_V (\sigma_x \epsilon_x + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dx dy dz$$

donde:

- $\sigma_x$  = esfuerzo normal
- $\tau_{xy}$  = esfuerzo cortante
- $\epsilon_x$  = deformación lineal
- $\gamma_{xy}$  = deformación angular
- $x, y, z,$  = direcciones en el plano
- $v$  = volumen

Para un material linealmente elástico como el nuestro y en el caso de esfuerzo uniaxial se tiene

$$\epsilon_x = \sigma_x / E$$

Puesto que los esfuerzos cortantes que hallamos en la lana al ser deformada son despreciables y por tanto también la deformación angular, la ecuación de energía elástica queda:

$$u = \iiint_V \frac{\sigma_x^2}{2E} dx dy dz$$

si como se vió anteriormente  $\sigma_x = -\frac{My}{I}$ , entonces:

$$u = \iiint_V \frac{\sigma_x^2}{2E} dV = \iiint_V \left(-\frac{My}{I}\right)^2 dx dy dz$$

$$= \int_L \frac{M^2}{2EI^2} \left| \iint y^2 dy dz \right| dx$$

$$= \int_L \frac{M^2}{2EI} dx$$

En nuestro diseño, suponiendo una fuerza  $P$  aplicada al extremo de la lana y ocasionada por el movimiento del tubo de Bourdon se tendrfa:(integrando a lo largo de la la minilla)

$$u = \int_L \frac{(Px)^2}{2EI} dx = \frac{P^2}{2EI} \int_0^L x^2 dx = \frac{P^2}{2EI} \frac{x^3}{3}$$

$$u = \frac{P^2}{6EI} L^3 \quad (2.5)$$

Esta energfa, o más bien cambio de energfa, si consideramos la primera ley de la termodinámica, debe ser igual al trabajo realizado sobre la lana que se deflecta (siempre y cuando consideremos un proceso adiabático y que no se genera calor en el sistema, además de que las fuerzas son aplicadas de manera cuasiestática para que la energfa cinética se desprecie), o sea:

$$W = u$$

y el trabajo realizado sobre la lana

$$W = P \frac{\Delta}{2} \quad (2.6)$$

donde  $\Delta$  es la deflexión obtenida en el extremo de la lana.

Iguando las ecuaciones (2.5) y (2.6) se obtiene:

$$P \frac{\Delta}{2} = \frac{P L^3}{6EI}$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI}$$

(2.7)

Como se mencionó al principio de este capítulo la deflexión máxima que se tiene por el impulso vertical que recibe la vaina del tubo de Bourdon es de 3mm, se aplica entonces este valor para  $\Delta$ .

De la ecuación (2.4) se despeja M

$$M = \sigma_{\max} \frac{bh^2}{6}$$

y reorganizando (2.7)

$$\Delta = \frac{PL L^2}{3EI} = \frac{ML^2}{3EI}$$

también se despeja M y se iguala con la anterior ecuación

$$M = \frac{\Delta 3EI}{L^2}$$

$$\frac{3EI\Delta}{L^2} = \sigma_{\max} \frac{bh^2}{6}$$

si  $I = \frac{bh^3}{12}$

$$\frac{3E bh^3 \Delta}{12L^2} = \sigma_{\max} \frac{bh^2}{6}$$

$\Delta = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{\max} L^2/h}{E}$	(2.8)
--	-------

Esta última ecuación, tiene como incógnitas la L y la h, sin embargo asocia la deflexión de la vaina de la viga con el esfuerzo máximo permisible, el módulo de elasticidad del material utilizado y los parámetros de diseño L y h, longitud y espesor de la viga respectivamente.

La conveniencia de haber obtenido la ecuación (2.8), es que a diferencia de las ecuaciones (2.7) y (2.4),  $\Delta$  no está en función de  $P$ , fuerza aplicada sobre la lana, la cual presupone dificultad para conocerla en la práctica. Ya que no conocemos otra ecuación que forme con la ecuación (2.8) un sistema de ecuaciones linealmente independientes que nos permita resolver para  $L$  y  $h$ , la manera más favorable en que se puede actuar es suponer un valor para cualquiera de las dos variables desconocidas y calcular entonces el otro.

Concentrándonos un poco en la ecuación última, se ve inmediatamente que la deflexión se comporta directamente proporcional al cuadrado de la longitud e inversamente al valor de  $h$ , siempre que  $\sigma_{\max}$  sea constante. Se define entonces que si a la laminilla de acero se le aplica una flexión, la flecha o sea la deflexión será mayor en cuanto la longitud de la lana aumente y/o el espesor disminuya, y también, la deflexión será menor si la longitud de la lana disminuye y/o su espesor aumenta.

### 2.3 Valores de los parámetros de diseño

Una manera muy práctica de elegir los valores más convenientes de  $h$  y  $L$ , es a partir de una tabla de varios valores correspondientes a la longitud y espesor de la lana, obtenida con la fórmula (2.8). Por medio de un programa iterativo sencillo, se obtuvo a través de un microprocesador, una serie de valores de  $h$  y  $L$  para distintas deflexiones. Conseguida así la tabla se logró afinar el criterio de elección de las medidas requeridas en la laminilla de acero.

En las siguientes páginas se presenta el listado y el

diagrama de bloques de este programa, así como la tabla resultante. Los valores elegidos de L y h fueron:

para  $\Delta = 3\text{mm}$ ,

$h = 0.63\text{mm}$

$L = 38\text{mm}$

El valor de L determinó por tanto la longitud de la base de la lana de acero, cuya manufactura será descrita en el capítulo siguiente (Capítulo 3).

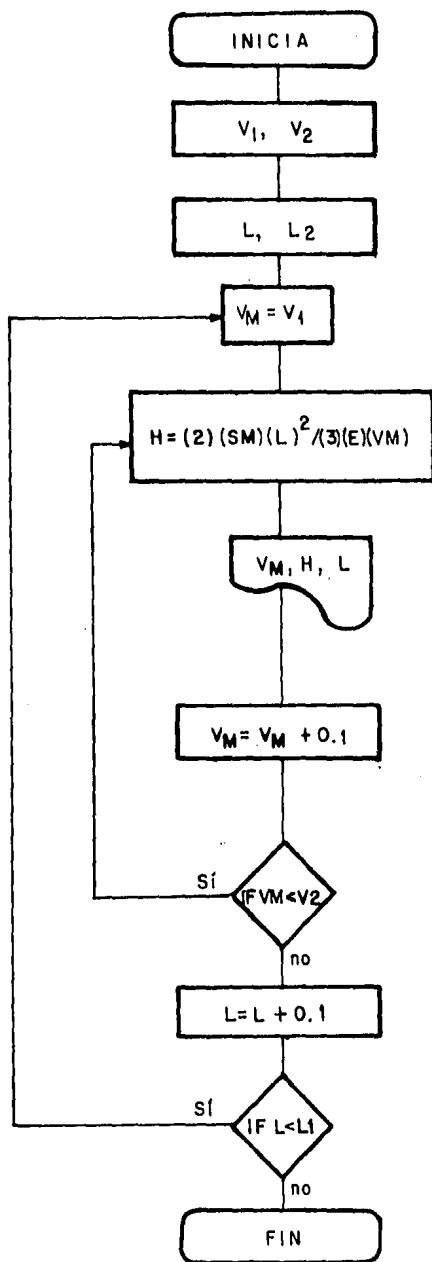


DIAGRAMA DE BLOQUES  
DEL PROGRAMA PARA  
CALCULO DE DIMEN -  
SIONES DE LA LAINA  
DE ACERO

```

10 'DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN TRANSDUCTOR DE PRESION
20 '
30 '
40 'EL SIGUIENTE PROGRAMA CONSISTE EN EL DISEÑO DE UNA VIGA EN CANTILEVER UTILIZADA EN EL TRANSDUCTOR
50 '
60 ' A partir de la ec. que define la flecha (flexion de la viga)
70 '      VM=PL/3EI
80 ' donde VM= flecha (cm)
90 '      P= fuerza aplicada al cantilever (kg)
100 '      L= longitud de la viga en c. (cm)
110 '      E= modulo de Young 2030000 Kg/cm 2 (*)
120 '      I= momento de inercia bh3/12 (cm 4)
130 '      SM= esfuerzo maximo (kg/cm 2)
140 '      vm(max)= 2EM L2/3hE
150 '
160 '      b=ancho v.c. (cm)      h=espesor v.c. (cm)
170 '      b=1/2 pulg. (*)
180 '

```

```

190 '
200 INPUT V1 : INPUT V2
210 INPUT L : INPUT L1
220 LPRINT "LONGITUD          FLECHA          ESPESOR"
230 VM=V1
240 E=2030000 : SM=4000
250 H=(2*SM*L2)/(3*E*VM)
260 LPRINT L, VM, H
270 VM=VM+0.1
280 IF VM<V2 THEN 240
290 L=L+0.1
300 IF L<L1 THEN 230
310 END

```

PROGRAMA PARA EL DISEÑO DE LA VIGA EN CANTILEVER



LONGITUD	FLECHA	ESPESOR
3	.2	.0591133
3	.3	.0394009
3.1	.2	.0431197
3.1	.3	.0420799
3.2	.2	.0672570
3.2	.3	.0440305
3.3	.2	.0715271
3.3	.3	.0476047
3.4	.2	.0759277
3.4	.3	.0506105
3.5	.2	.0004590
3.5	.3	.0536390
3.6	.2	.0051231
3.6	.3	.0567400
3.7	.2	.0099179
3.7	.3	.0599453
3.8	.2	.074044
3.0	.3	.0632293
3.9	.2	.0799014
3.9	.3	.0666009
4	.2	.10509
4	.3	.0700602
4.1	.2	.11041
4.1	.3	.073607
4.2	.2	.115062
4.2	.3	.0772413
4.3	.2	.121445
4.3	.3	.0009633
4.4	.2	.127159
4.4	.3	.0047720
4.5	.2	.133005
4.5	.3	.0006699
4.6	.2	.138982
4.6	.3	.0926545
4.7	.2	.14509
4.7	.3	.0767260
4.8	.2	.15133
4.8	.3	.100007
4.9	.2	.157701
4.9	.3	.105134
5	.2	.164203
5	.3	.109469

TABLA DE VALORES CORRESPONDIENTES A DIFERENTES  
TAMAÑOS DE LA LAINA DE ACERO

## CAPITULO 3

### MANUFACTURA Y ACOPLAMIENTO

Obtenidas las características de la lana de acero, se prosiguió a definir la forma en que debería ser apoyada fijamente sobre uno de sus extremos; el otro extremo quedaría libremente apoyado al tubo de Bourdon.

#### 3.1 Base de la lana de acero

Se decidió, después de revisar varias alternativas, manufacturar una base como la representada en la Fig. 3.1. El tamaño de la pieza, lo determinaron el ancho de la lana de acero y el diámetro de los tornillos que sirven para acoplarla.

La base está formada por dos piezas rectangulares colo cadas una horizontal y otra verticalmente, formando un apoyo en forma de "L acostada"; la base en su parte posterior mantiene un área adecuada para ser unida a la lana de acero con tornillos estándar de latón de 1/8 pulgada (en diámetro).

El rectángulo alargado de la base quedó soldado con estaño a una de las caras del soporte del dispositivo Bourdon, como se puede verificar en la Fig. 3.2.

Cabe hacer la aclaración que el soldado requirió de un potente caudín para calentar a relativas altas temperaturas las dos bases, la que sostendría la lana de acero y la del mismo manómetro utilizado. Esta acción se llevó a cabo

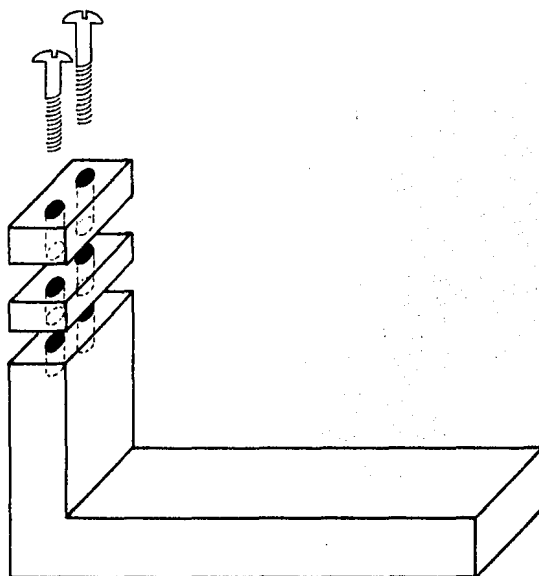


FIG.3.1 BASE DE LA LAINA DE ACERO

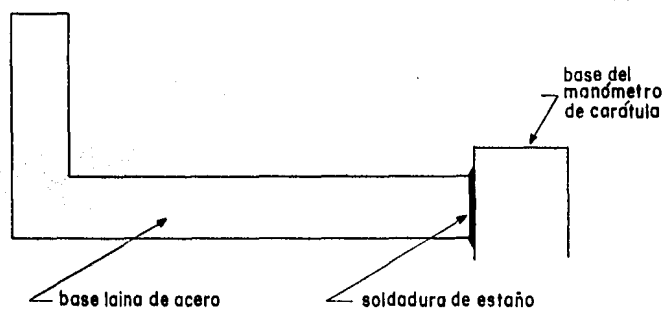


FIG.3.2 ACOPLAMIENTO DE LA BASE DE LA LAINA DE ACERO Y LA BASE DE MANÓMETRO

con gran cuidado, puesto que el tubo de cobre de Bourdon está unido a su base con soldadura estaño, lo cual implicaba que si llegaba a derretirse el estaño, éste podría obstruir el pequeño orificio con que cuenta la base del manómetro y que permite la entrada del fluido al tubo de Bourdon. Se pensó en unir las bases con soldadura bastante resistente, como por ejemplo soldadura de plata, sin embargo el uso de ésta requeriría temperaturas aún más elevadas que no sólo derretirían al estaño esparciéndolo sobre la superficie interior del tubo falcado y tapando el orificio comunicador de la base, sino que podrían ocasionar esfuerzos residuales -dureza, por ejemplo- en el cobre de Bourdon, lo cual a su vez repercutiría en el comportamiento lineal que presenta este último con respecto a la presión que algún fluido ejercería sobre él.

La base en forma de "L" fue manufacturada con fresadora a partir de una pieza de latón. Se eligió este material porque asemeja en su coeficiente de dilatación al material con que está fabricada la estructura del manómetro; de esta forma se logra que al haber cambios considerables de temperatura en el dispositivo-transductor, las modificaciones que se tengan por dilatación, no influyan en el correcto ajuste entre las bases. Es preciso explicar que cualquier movimiento de la base que fuese independiente al manómetro repercutiría en una incorrecta medición a través de los indicadores de deformación. La laminilla de acero debe deformarse únicamente a causa del deslizamiento que el tubo falcado de Bourdon tenga, por tanto la sujeción de ésta debe ser perfecta.

Las superficies de las caras de la base que tuvieron que unirse -una a la laina y la otra a la base del manómetro- fueron finamente desvastadas con una fresadora para

eliminar rugosidades y así asegurar un acoplamiento rígido.

### 3.2 Accesorios del acoplamiento

Dos accesorios se incluyeron para mejorar el acoplamiento de la base en forma de "L acostada"; el primero fue una placa de latón -también- unida a las caras laterales de la base, esto asegura que no varíe el ángulo recto existente entre la pieza vertical y la horizontal.

Haciendo un paréntesis en relación a este punto, diremos como importante anotación que antes de que se colocara la placa, y habiéndose instrumentado con un sólo ID (indicador de deformación o strain gages) la lana de acero con sólo apoyar la mano sobre la base tipo ángulo, se deformaba.

El segundo accesorio que se implementó, fue un par de pequeñas placas de latón manufacturadas con precisión y con un acabado cuidadoso. Esto último se logró, devastando las piezas sobre lija muy delgada, y ésta a su vez apoyada sobre una superficie lisa como lo es el cristal. La función de las placas es aplastar la lana de acero por sus caras inferior y superior y no permitir el movimiento de ésta. La manera en que fueron unidas las pequeñas placas, la laminilla de acero y la base angular de latón fue por medio de tornillos de latón de 1/8 de pulgada de diámetro. Como se puede ver en la Fig. 3.1, la parte vertical de la base se abocardó y machueló; las plaquillas y la lana de acero se agujeraron únicamente.

Los tornillos -que atraviesan primero una de las plaquillas, después la laminilla y la segunda plaquilla para finalmente enroscar con la base- son del mismo material del que están fabricados los elementos que acopla. Lo anterior

se debe a que si sucediera alguna elevación de temperatura en el dispositivo-transductor, las dilataciones serían del mismo orden para no permitir que disminuyera la tensión de sujeción con los tornillos. Se eligió utilizar este tipo de acoplamiento (a través de tornillos) puesto que tiene la conveniencia de permitir el desmontaje de la lana de acero y así trabajar en ella cuando se quiera, o sencillamente para intercambiarla cuando sea necesario.

Por otra parte, para obtener un punto de contacto único entre la lana de acero y el extremo del tubo Bourdon, se utilizó un balín de acero de  $\phi = 1/8$  pulgada, el cual se unió con pegamento -resistente a temperatura- al extremo final del Bourdon, y quedó colocado por debajo de la laminilla instrumentada a la mitad del ancho de la laminilla y del tubo falcado de Bourdon, como se ilustra en la Fig. 3.3.

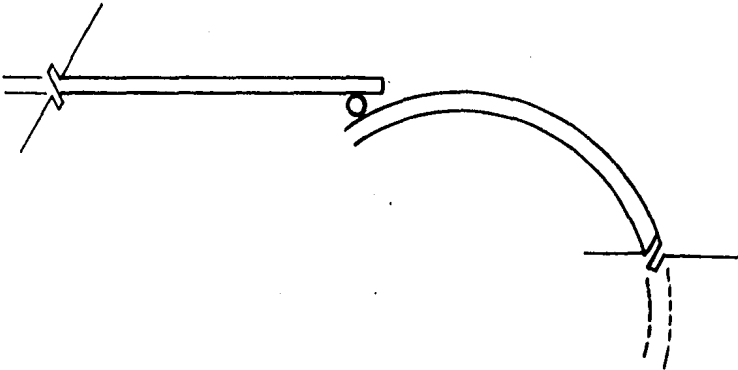
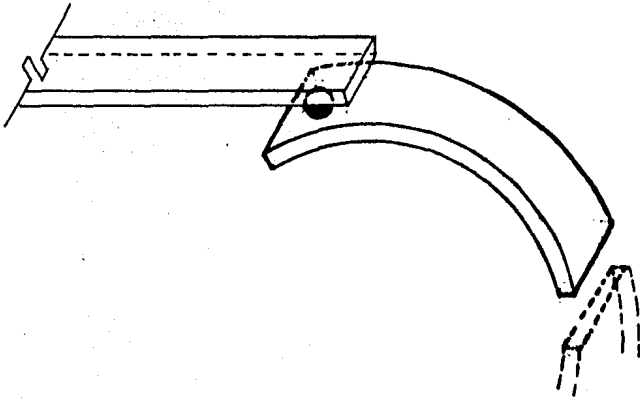


FIG. 3.3 CONTACTO DE LA LAINA DE ACERO CON EL TUBO DE BOURDON.

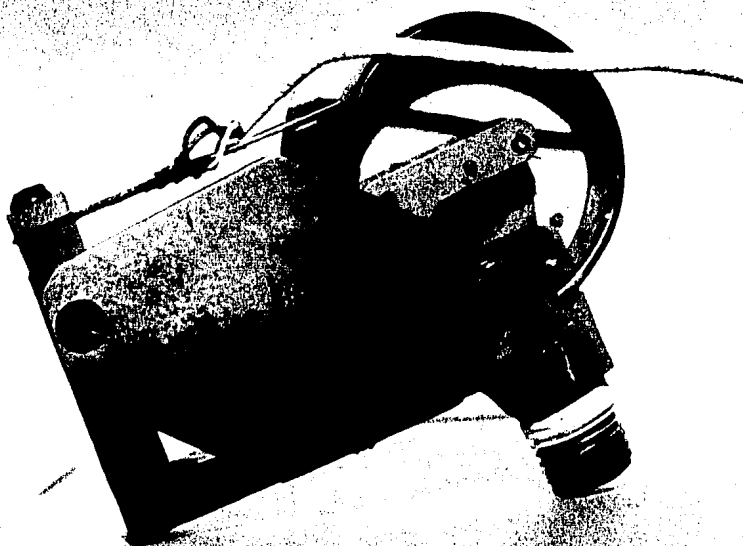


Fig. 3.4 (Fotografía) Transductor construido.  
Acercamiento de los accesorios adaptados en el dispositivo.



## CAPITULO 4

### INDICADORES DE DEFORMACION\* (ID)

Como se describió previamente en el Capítulo 1, en la adaptación de ID al sistema del tubo falcado de un manómetro de carátula, se utilizaron ID del tipo hojuela metálica (metal-foil strain gages). La elección por este tipo de ID se debió a su relativo bajo costo y su gran versatilidad. En este capítulo se explica brevemente el antecedente de los ID de hojuela metálica, sus características físicas, el principio de funcionamiento y algunas otras ideas de interés.

Aparece una clasificación clara sobre los ID de hojuela metálica en el Apéndice B donde también en complemento a la información sobre ID, se definen los diferentes tipos de estos.

#### 4.1 Características físicas del ID de hojuela metálica

La modalidad de este indicador es que la red resistiva está formada por una hojuela-metálica obtenida con un proceso de fotograbado. Los primeros indicadores de deformación de hojuela metálica se fabricaron en 1952 por Saunders y Roe en Inglaterra.

Debido a los refinamientos de las técnicas de fotograbado se han podido obtener indicadores de bajo costo; por ello y por la versatilidad del proceso se pueden producir una amplia variedad de tamaños y configuraciones de estos. Además los métodos de manufactura están relacionados con

\*strain gages

aquellos utilizados en los circuitos impresos de uso bastante extendido lo que permite aprovechar los conocimientos adquiridos en el área.

Los indicadores de hojuela generalmente se utilizan para medir esfuerzos más grandes que los indicadores de alambre (metal-wire), y no se dañan tan fácilmente, en especial en ciertas configuraciones delicadas de la superficie transmisora de la deformación (superficie transferible). Las redes resistivas de hojuela consisten de una región muy delgada de hojuela, aproximadamente de 3 a 8 micrones de espesor; de una película de metal (o sea una hojuela) se logra una red-resistiva de cierta configuración requerida a través del fotograbado, obteniéndose por tanto una hojuela modificada. El fotograbado realmente lo que hace es remover el material necesario (excedente de metal) para dar una configuración determinada a la hojuela.

Puesto que la hojuela resistiva es muy frágil y fácil de distorcionar, arrugar o rasgar, la película metálica normalmente se une a una delgada hoja plástica que sirve como portadora. Esto permite que el indicador se pueda manejar con facilidad para transportarlo y pegarlo. Además, el fotograbado se puede llevar a cabo sobre la película metálica después de unirla a su portador, ofreciendo así mayor comodidad a la producción de ID de hojuela metálica.

El primer material que se uso para fabricar portadores fue el papel. Con él se obtenían portadores para indicadores de alambre, sin embargo este material ha sido reemplazado por polimidio (polymide) que es resistente y muy flexible; existen estas hojas de polimidio en espesores de 0.001 in (0.025 mm). También, para aplicaciones de transductores, donde la precisión y la linealidad son muy importan-

tes se utiliza una capa delgada de epoxi cuyo módulo de elasticidad es muy grande, sin embargo para uso general de ID no es muy adecuado, puesto que es quebradizo y fácilmente podría romperse durante la instalación del indicador. Otro tipo de portador se fabrica de un epoxi de fibra de vidrio reforzada (en vez de epoxi puede ser un fenol) y se emplea cuando los ID estarán expuestos a deformaciones cíclicas con frecuencias de alto nivel o cuando la vida por fatiga del sistema de indicación es importante; también dichos portadores se pueden usar para aplicaciones de temperatura moderada, arriba de 400°C. Para aplicaciones de temperaturas elevadas es común usar ID soldables.

En general, los materiales de las hojuelas de los indicadores y de los portadores son similares a los aplicados en ID de alambre; las aleaciones de constantán\* y cromo-niquel predominan como materiales de las hojuelas metálicas. Otros materiales se usan para aplicaciones específicas, por ejemplo, una hojuela de espesor 0.05mm, 95% titanio, 5% aluminio se emplea para mediciones de deformaciones muy grandes (inclusive que excedan el límite de cedencia).

#### 4.2 Principio de funcionamiento del ID resistivo

El efecto piezoresistivo+ es decir el fenómeno en que se basa el principio de todo ID de resistencia eléctrica fue descubierto en 1856 por Lord Kelvin, quien notó que al tensionar alambres de cobre e hierro, estos eran modificados en su resistencia. Verificó también que el hierro tenía una variación mayor que el cobre; por medio de un puente de Wheatstone midió los cambios de resistencia eléctrica, concluyendo a través de este experimento tres hechos importan-

\* constantán o Advance es una aleación: Ni 45% y Cu 55%

+ piezo-resistividad: es el cambio de resistencia de un conductor debido al cambio de longitud o en área de la sección transversal. En materiales piezoresistivos, las deformaciones mecánicas del material producen cambios en la resistencia eléctrica.

tes que fueron base para el desarrollo de los ID;

- a) la resistencia eléctrica de un alambre cambia en función de la deformación.
- b) diferentes materiales tienen diferentes sensibilidades
- c) el puente de Wheatstone puede utilizarse para medir esos cambios de resistencia con precisión.

Es interesante comentar que tuvieron que pasar 80 años para que aparecieran disponibles comercialmente ID basados en el descubrimiento de Lord Kelvin.

Tenemos que la resistencia de un conductor se define como:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4.1)$$

donde

$\rho$  = resistividad del material

L = longitud del conductor

A = área transversal del conductor

diferenciando la ecuación y dividiendo entre la resistencia

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (4.2)$$

la diferencia de área representa el cambio en la sección transversal del conductor debido al esfuerzo transversal, que es

$$- \nu \frac{dL}{L}$$

$\nu$  = módulo de Poisson

si  $d_0$  es el diámetro del conductor antes de la deformación, entonces el diámetro después de la deformación es:

$$d_d = d_0 \left(1 - \nu \frac{dL}{L}\right)$$

y con esta ecuación se obtiene

$$\frac{dA}{A} = -2 \nu \frac{dL}{L} + \nu^2 \left(\frac{dL}{L}\right)^2$$

y se puede eliminar  $\nu^2 \left(\frac{dL}{L}\right)^2 \approx 0$ , entonces sustituyendo en (4.2)

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} (1+2\nu) \quad (4.3)$$

si definimos sensibilidad o factor de indicación (gage factor) como la relación entre las tasas de cambio de resistencia y longitud obtenemos

$$S = \frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon}$$

como se puede observar en esta última ecuación, la sensibilidad dependerá del cambio de dimensiones del conductor ( $1+2\nu$ ) y del cambio en la resistividad o resistencia específica, siendo el primero el término de más peso. Ejemplos de sensibilidad para diferentes materiales se muestran en la tabla siguiente:

<u>Material</u>	<u>Sensibilidad</u>
Constantán	2.1
Nicromo V	2.1
Isoelastic	3.6
Karma	2.0
Armour D	2.0
Tungsteno de platino	4.0

La mayoría de los ID de resistencia eléctrica son fabricados de constantán (advance), aleación de cobre y níquel muy útil en estas aplicaciones por las siguientes razones: el valor de la sensibilidad  $S$  es lineal en un amplio rango de deformación y no varía cuando el material se vuelve plástico; la aleación tiene un valor de resistividad muy alto ( $\rho = 0.49 \mu\Omega\text{m}$ ), además tiene una excelente estabilidad térmica y no es influenciada determinadamente por los cambios de temperatura cuando se monta sobre materiales estructurales comunes; los pequeños cambios de resistencia en la aleación, inducidas por temperatura pueden ser controladas con incrustación de impurezas o tratamiento térmico.

El material isoelástico tiene una gran sensibilidad y por ella se puede utilizar en sistemas dinámicos, sin embargo es extremadamente dependiente de los cambios de temperatura. Los demás materiales son utilizados con propósitos que permiten hacer mediciones de esfuerzo a temperaturas mayores a los  $250^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.3 Puente de Wheatstone

Hasta el momento hemos dicho que los ID de hojuela metálica -y en general todos los ID de resistencia eléctrica- al ser deformados varía su resistencia ( $R_1$ ), ahora bien ¿cómo conocer esas variaciones para así conocer las deformaciones en nuestro espécimen? La respuesta son el potencióme

tro y el puente de Wheatstone (Fig. 4.1 y 4.2). Con cualquiera de estos dos dispositivos se logra transferir el cambio de resistencia en un cambio de voltaje, ambos son utilizados en aplicaciones dinámicas, sin embargo, para el puente de Wheatstone, la señal de voltaje  $\Delta E$  (correspondiente a un cambio de resistencia  $\Delta R$ ) es una función de  $\Delta R$  cuyo término no-lineal es mayormente despreciable que cuando se utiliza un potenciómetro.

En el potenciómetro indicado en la Fig. 4.1,  $R_1$  es la resistencia del indicador de deformación; para el puente de Wheatstone, cada una de sus ramas o varias de ellas puede representar respectivamente ID. En la Fig. 4.3 aparecen los arreglos comúnmente utilizados. Para el caso (b) y (c) la  $R_T$  es utilizada para compensación de temperatura; en general  $R_i$  es la resistencia del indicador y las  $R$  con subíndice numérico son resistencias de valor constante.

En este trabajo se aplicaron los casos (c) y (d), se utilizó un solo ID primeramente y luego se probaron 4 ID formando un puente de Wheatstone con cuatro ramas activas.

La sensibilidad para ambos circuitos se define como

$$S_c = \frac{\Delta E}{\epsilon} \quad (4.4)$$

donde  $\Delta E$  es el cambio en la señal de voltaje debido al cambio de resistencia en el circuito y  $\epsilon$  es la deformación sobre el ID.

Al sustituir en la anterior ecuación los valores de  $\Delta E$  en función de las resistencias, de los cambios de resistencia y del voltaje  $V$  del puente se obtiene para cada uno

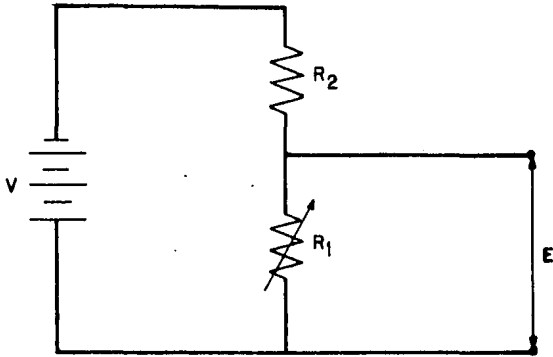


FIG. 4.1 CIRCUITO POTENCIOMETRO

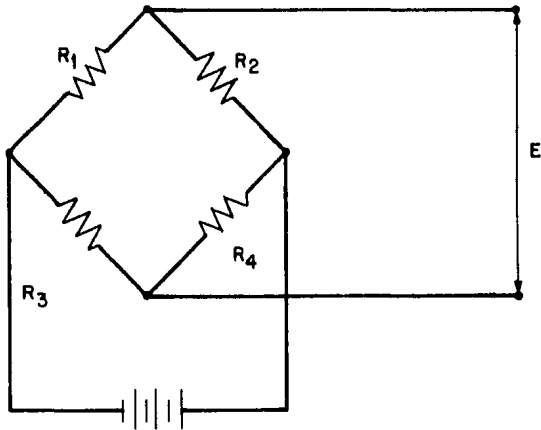


FIG. 4.2 CIRCUITO DE WHEATSTONE



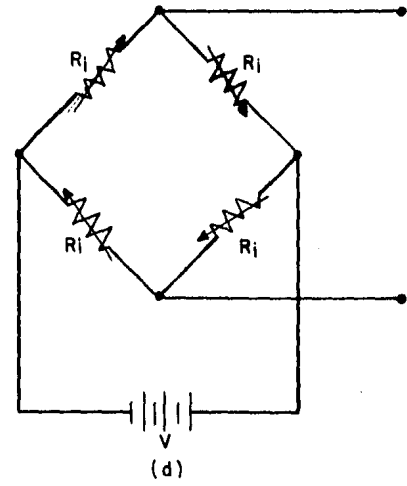
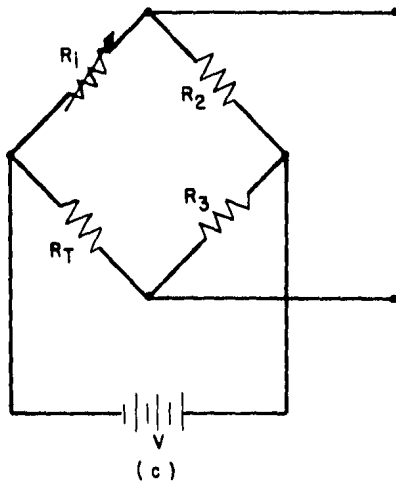
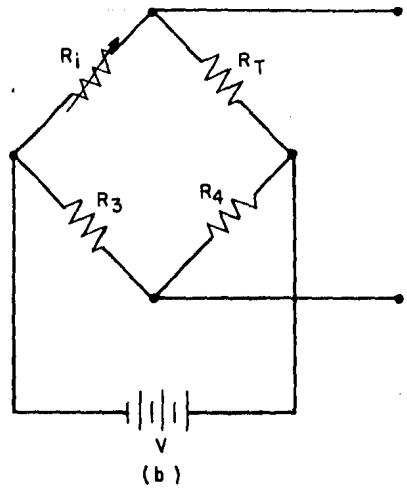
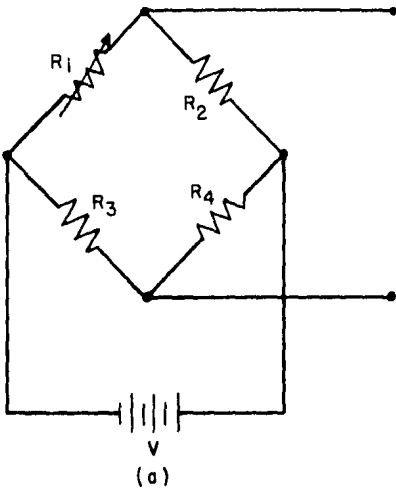


FIG. 4.3 ARREGLOS DE PUENTE DE WHEATSTONE

de los casos (ref. Dally.):

Para el caso (a):

$$S_c = \frac{r}{1+r} S_i \sqrt{P_i R_i} \quad (4.5)$$

$$r = \frac{R_2}{R_i}$$

para el (b):

$$S_c = 2 S_i \sqrt{P_i R_i} \quad (4.6)$$

$P_i$  = potencia en el indicador

$S_i$  = sensibilidad del indicador

Como se puede observar en estas dos últimas ecuaciones el circuito con 4 ID (ec. 4.6) tiene una sensibilidad más del doble que el circuito con un solo ID (ec. 4.5), puesto que el término  $\frac{r}{1+r}$  es cercano a la unidad.

#### 4.4 Acoplamiento de los ID al transductor

Cuando surgió la idea de transducir la señal del tubo de Bourdon a un manómetro de carátula, por medio de una laina instrumentada con indicadores de deformación (ID), la primera duda que apareció fue si el comportamiento de este dispositivo sería lineal, en caso de que no sucediera así el diseño era poco conveniente y hubiera sido necesario modificarlo.

Se llevaron a cabo dos instrumentaciones, una con un solo ID y la otra con cuatro de ellos.

##### Acoplamiento de un solo ID

Para averiguar la linealidad del dispositivo pretendido se instaló solamente un ID sobre la superficie superior de la laina de acero. Este ID se eligió de tipo estándar (modelo EA-06 BG 120 de Micro-measurements) y de bajo costo puesto que solamente -repetimos- se quería conocer el comportamiento de la adaptación ideada.

El indicador se pegó sobre la laina en la parte más cercana posible al empotramiento, en donde aparecen los mayores esfuerzos de tensión al empujar el tubo de Bourdon el extremo libre de la laminilla.

La colocación de un ID debe definitivamente ser la más óptima con respecto al esfuerzo que se quiere medir, sin embargo en algunos casos, por problemas meramente de espacio o de configuración en la superficie, la posición de los ID no es adecuada y no se logra registrar la señal de salida

con la mejor sensibilidad en relación al esfuerzo.

En nuestro caso, no hubo problema en este sentido, el único cuidado que había que tener era alinear bien el ID en el lugar definido.

Antes de ser pegado el ID, fue marcada la laminilla de acero trazando con un marcador de punta un eje a lo largo de su superficie, como se observa en la Fig. 4.4. Las hojuelas tienen marcadas un sistema de ejes coordenados que se hicieron coincidir con el eje delineado en la lámina. Este sencillo procedimiento asegura la correcta posición de los ID.

La técnica de pegado del ID en términos generales consiste en pulir y limpiar perfectamente la superficie donde será colocado el portador-hojuela del ID para que no exista rugosidad alguna.

Las razones importantes son dos: en primer lugar la rugosidad altera el empalme preciso entre el portador del ID y la superficie a la cual se quiere unir, y el segundo que en el peor de los casos esa rugosidad puede iniciar un posible desprendimiento en una región del portador del ID.

En esta primera instrumentación la limpieza de la superficie sobre la que quedó pegado el ID fue tan estricta como la llevada a cabo en una segunda instrumentación la cual se tratará más adelante.

Habiendo pulido con lija muy delgada la superficie de la lámina de acero en donde se colocarían los ID el primer paso fue quitar de dicha área el polvo y la grasa; en este

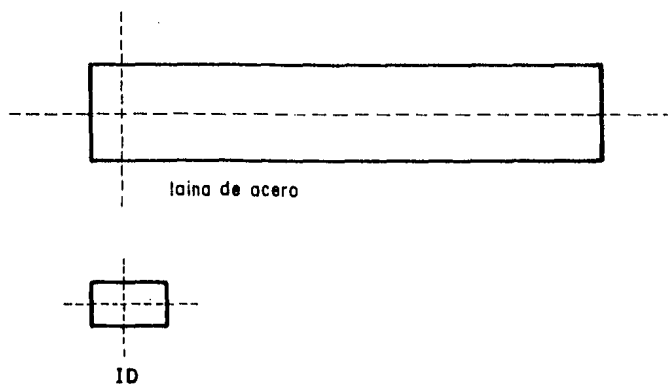


FIG.4.4 TRAZADO DE LA LAINA DE ACERO

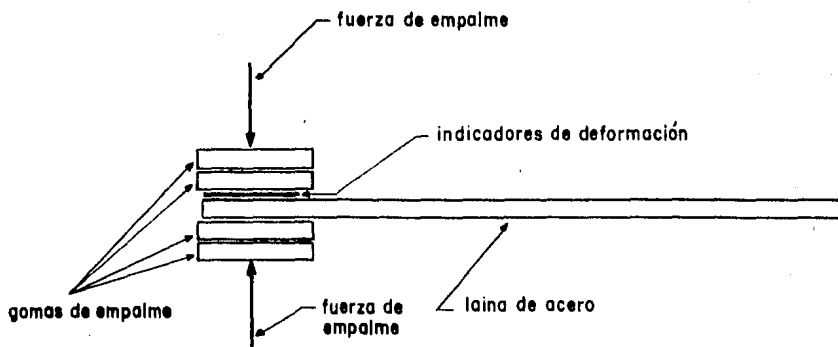


FIG.4.5 EMPALME DEL I D

caso se utilizó acetona, sin embargo existe desengrasantes que incluso son fabricados exprofeso para la industria de ID (como el "chlorothere Nu" de Micro-measurement).

El segundo paso en la preparación del pegado de los ID consistió en la utilización de dos sustancias: un acondicionador y un neutralizador; el primero, que es un ácido, se aplicó sobre la superficie de la lana de acero, e inmediatamente después se hizo lo mismo con el neutralizador, sustancia alcalina que detiene el ataque del ácido sobre el metal, para así, neutralizar la reacción. Estas dos sustancias en términos comerciales se ofrecen como: M-Prep. Conditioner A, y M-Prep. Neutralizer 5 ambas de la marca Micro-measurements.

Finalizada la preparación para el pegado del ID se utilizó un pegamento de contacto, (M-Bond 200 Adhesive-M-M) ungiéndolo sobre la lana; inmediatamente se trasladó el ID y al hacerlo se tomó al portador-hojuela por uno de sus extremos, con una pinzas delgadas, previamente limpiadas para no llevar impurezas al ID.

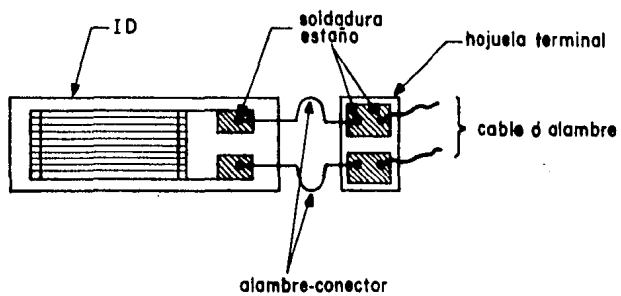
Para lograr que el pegamento que se encontraba en la lana y el portador del ID consistiera en una muy delgada capa y no se formaran grumos o burbujas de aire, se presionó el empalme entre estas piezas. Dos gomas plásticas compactas colocadas, una sobre el ID y otra en la parte posterior de la lana, y sobre estas dos piezas de material rígido, fueron aplastadas ligeramente con unas pinzas especiales. Esta acción se ilustra en la Fig. 4.5. Debe tenerse en cuenta que la superficie del ID puede dañarse con el rozamiento de un metal o de algún material con cierta dureza, es por ello que sobre la hojuela del ID se ejerce una pre-

sión a través de un material suave como el plástico utilizado en esta ocasión. Después de permitir por solamente pocos minutos esta presión -puesto que el pegamento era de contacto- el siguiente paso fue recubrir con un permeabilizante (M-Coat B Nitrile Rubber Coating M-M) la superficie libre del portador y de esta forma proteger al ID. Esta sustancia se aplica y se deja secar durante una hora a no más de 95°F, después se da un curado; es decir se le permite secar y endurecer durante 24 horas con el mismo límite de temperatura (75°F). Al ungir este componente químico se debe realizar con uniformidad, al igual que al adhesivo que se emplee.

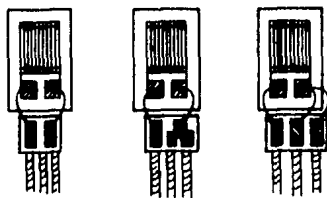
Aunque, como se pudo ver, en esta instrumentación se hizo uso -tanto en la preparación como en el pegado del indicador de deformación- de sustancias comerciales y exclusivas para la industria de estos transductores, es posible aprovechar componentes de uso general y que cumplen con los requisitos de adecuada limpieza de la superficie que llevará los ID.

Otro punto en consideración, es la conexión de cables de salida y entrada de los ID. Auxiliados por la Fig. 4.6 y 4.7 se puede observar que en las terminales del ID se suelda uno de los extremos de un pedazo de alambre delgado (calibre # 24), el otro extremo se lleva a una hojuela-terminal sobre la cual también se suelda. Después, a estas terminales se les unen los extremos del cable que finalmente se conectan a dispositivos electrónicos (fuente de poder, amplificador, osciloscopio, etc.).

El uso de hojuelas terminales permite que los cables no ejerzan tirones o jalen directamente a los ID. Además con estos accesorios se pueden hacer conexiones cuando se utiliza



**FIG.4.6 USO DE HOJUELAS TERMINALES**



**FIG.4.7 ARREGLOS DE HOJUELAS TERMINALES**



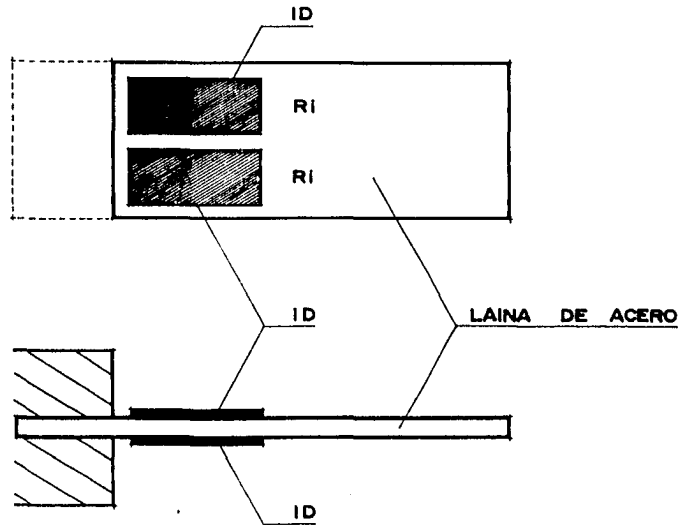
una serie de ID como se verá más adelante.

Con respecto a esta técnica de instalación de ID expuesta en estas y anteriores páginas, considero importante hacer la siguiente anotación: la preparación, el pegado, el recubierto y en sí la "instrumentación" de los ID son acciones que además de una técnica específica, exigen experiencia y destreza manual en quien las lleva a cabo, si no se cuenta con estas características es muy posible no obtener buenos resultados al utilizar los ID.

#### Acoplamiento de cuatro ID

Habiendo confirmado la linealidad del adaptamiento hecho al manómetro de carátula de tubo de Bourdon, se determinó instalar en vez de solamente un ID, cuatro ID sobre la lamina de acero, para así lograr una mejor sensibilidad, (Fig.4.8)

En esta segunda instrumentación se utilizaron ID (modelo MA-06-250-BF-350 de M-M) que para mediciones de esfuerzo dinámicas tienen un rango de temperatura de  $-195^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ , para mediciones estáticas de precisión su rango es menor (de  $45^{\circ}\text{C}$  a  $95^{\circ}\text{C}$ ); estas características se consideraron suficientes puesto que el objetivo del transductor era medir la presión en vapor, cuya temperatura máxima es de  $200^{\circ}\text{C}$ . Si conectamos el instrumento a una línea de vapor, hay que recordar que existe una transferencia de calor del dispositivo al ambiente exterior, y por la cual la temperatura del fluido es mayor que la temperatura que pudiese alcanzar la laminilla de acero cuya superficie tiene adheridos los ID. El procedimiento empleado para pegar estos 4 ID, fue diferente al que se realizó en la primera instrumentación. En esta ocasión se adherieron con un pegamento (M-Bond 4-3)



ID = INDICADORES DE DEFORMACION CON RESISTENCIA ELECTRICA RI

FIG. 4.8 CONFIGURACION DE LOS CUATRO ID SOBRE LA LAINA DE ACERO  
(conexion referida a la fig. 4.3)

que requiere alta temperatura.

La limpieza y el marcado de la superficie sobre la cual fueron colocados los ID se llevó de igual manera que en la instrumentación anterior. Luego se colocaron los ID después de esparcir el pegamento en la lana de acero, dos de ellos en la cara superior de la lana y los dos restantes en la parte inferior. Hecho lo anterior fue necesario introducir la lana con los ID a un horno eléctrico durante 1 hora a una temperatura constante de 170°C -registrada con un termómetro de mercurio- después de cumplido ese tiempo y retornar a la temperatura ambiente, se realizó el curado, o también endurecido del pegamento, calentando nuevamente la laminilla, pero ahora a 10°C más (o sea 180°C) que la vez primera durante una hora en el mismo horno.

Las temperaturas a las cuales se hizo secar y endurecer el pegamento son determinadas por el fabricante del adhesivo.

Habiendo soldado los cables y alambres necesarios para concluir la instrumentación de la lana de acero, lo siguiente, al igual que en la primera instrumentación, fue re cubrir los ID para su protección; también se usó protector de caucho de nitrilo (M-coat B), el cual evita que cierto ro zamiento (o fricción) y en sí el ambiente dañen a los trans ductores.

La instalación o acoplamiento de los ID sobre la lana de acero se han especificado en este capítulo; para algún caso diferente es posible que sea necesario tomar otras con sideraciones especiales, sobre todo en lo que concierne al pegado del ID. En el Apéndice C se presenta una metodología

general para colocar los indicadores de deformación y además se da una breve clasificación de los pegamentos requeridos para diferentes casos.

Construido el sistema tubo de Bourdon-laina de acero-base, e instalados los ID en la laina de acero, el siguiente paso, primero utilizando un ID y luego cuatro ID, fue conocer las características de comportamiento del dispositivo construido. En el siguiente Capítulo 5 se trata dicho punto a través de un análisis basado en la calibración del dispositivo.

## CAPITULO 5

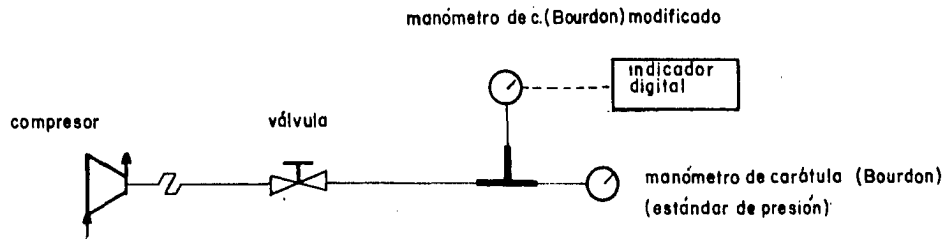
### CARACTERISTICAS ESTATICAS

#### 5.1 Sistema de calibración estática

Adherido e instrumentado el ID que primeramente se colocó sobre la lina de acero acoplada al tubo de Bourdon, lo siguiente fue realizar una calibración para conocer las características (linealidad, histéresis, etc.) del dispositivo creado. Así pues, se instaló un manómetro de carátula (calibrado y sin modificar) en serie con el transductor de presión (manómetro adaptado con ID) a una línea que suministra aire de un compresor -cuya presión máxima era de 7 kg/cm -, con el objeto de proporcionar sobre los medidores una señal de presión de aire que los afectara de igual forma.

Se utilizó una válvula de cuerda fina para lograr el control del flujo de aire y permitir un apropiado manejo del fluido.

El sistema de calibración entonces, quedó como sigue: el aire parte de un compresor y recorre a través de una manguera plástica (de diámetro interior aproximado de 0.6 cm) hasta llegar a la válvula que lo controla. Esta última se instaló a un accesorio "T", enroscada en uno de los extremos opuestos de la "T"; las otras dos roscas se emplearon para instalar cada uno de los manómetros, el que se utilizaría como estándar y el que se quería observar. En la Fig. 5.1



**FIG. 5.1 SISTEMA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION**

aparece un diagrama del sistema de calibración. Cabe hacer la aclaración que se utilizaron accesorios de reducción y de ampliación que no se indican en el diagrama.

El valor de presión en la línea se leyó en  $\text{kg/cm}^2$  directamente de la carátula del manómetro utilizado como estándar. El valor sensado por el transductor de presión construido (manómetro adaptado con ID) se verificó con un indicador digital comercial (Strain Indicator) para ID; las unidades que aparecen en el indicador son voltios, sin embargo puesto que estos son dependientes del circuito del aparato (además del valor de deformación en los ID) los llamaremos únicamente unidades digitales. Con ello queda claro que el valor de voltaje obtenido en el indicador es el de la salida de un puente de Wheatstone con una rama activa (consistente en el ID) con algunos componentes adicionales, y por lo tanto es específico para el indicador digital.

Primeramente, antes de efectuar las pruebas de calibración, se aplicó varias veces aire a presión al transductor, desde la mínima a la máxima posible, en forma alternativa, es decir abriendo y cerrando el paso del aire; operación que se repetía con diferentes frecuencias. La finalidad de esto fue relajar los esfuerzos residuales que existieran en el tubo de Bourdon o en la lana de acero, tensiones que se pudieron adquirir -p. ejemplo en el primer caso- al calentar la estructura del manómetro cuando fue soldado a la base de la laminilla o base en forma de "L acostada", y -en el segundo caso- al apretar los tornillos que sujetan la propia laminilla instrumentada.

## 5.2 Calibración estática con un solo ID

La forma en que se llevó a cabo la calibración fue la siguiente: a partir de una presión cero se incrementó en pequeños intervalos -entre 0.3 y 0.7 kg/cm<sup>2</sup>- hasta llegar al valor máximo definido de 6 kg/cm<sup>2</sup>; para cada valor indicado en el manómetro correspondía uno que el indicador digital presentaba.

Habiendo llegado a la presión máxima, enseguida se decrementó en similares intervalos; al retornar a cero, nuevamente se aumentó la presión al punto de los 6 kg/cm<sup>2</sup>. Para cada uno de los procesos se graficaron los datos obtenidos, los cuales se muestran en las gráficas (1), (2) y (3) respectivamente.

También, se muestra una gráfica, que contiene los datos agrupados -gráfica (4.a)- de los tres procesos.

De las gráficas (1) y (2) se encuentra que el mecanismo presenta cierta histéresis, un análisis previo indica que los dispositivos mecánicos, como lo es el sistema manómetro de carátula, consisten de elementos que presentan dicho fenómeno, es seguro que del dispositivo -transductor construido sean las partes metálicas- en específico el tubo de Bourdon y sus accesorios- y no de los ID quienes hagan aparecer este problema..

Deteniéndonos un momento, en este fenómeno, podemos advertir lo siguiente:

De los manómetros utilizados -uno modificado y el otro que sirvió como referencia-, el instrumentado tenía un tu-



bo de Bourdon más pequeño. Esta diferencia en tamaño, que significa una diferencia en volumen participa en la causa de la histéresis. Sabemos que el fluido ejerce una presión en los tubos de Bourdon que es la misma para ambos, conforme se incrementa dicha presión. Los tubos se deforman y accionan su sistema de relojería, al disminuir la presión los tubos intentan recuperar su estado inicial. Sin embargo, al parecer en el tubo de Bourdon de menor capacidad queda aire atrapado debido al sistema de fluencia que existía en la instalación utilizada en la calibración. Sin duda alguna, esta hipótesis tendría que ser confirmada con experimentos convenientes y análisis objetivos. La razón de la existencia de histéresis en el dispositivo transductor queda como objeto de estudio para otro trabajo; la posible causa de ésta solamente se comenta en forma superficial en el presente escrito.

La gráfica (4.a) muestra una serie de puntos que se hallan entre las líneas observadas en las dos primeras gráficas. Puntos que corresponden a una nueva toma de datos desde cero  $\text{kg/cm}^2$  a  $6 \text{ kg/cm}^2$ ; o sea al tercer proceso. Es importante hacer la aclaración que en el recorrido no siempre se incrementó la presión positivamente, sino que hubieron pequeños retornos en el cambio de ésta. Lo anterior se debió a un manejo alternativo de la válvula, considerando que los incrementos positivos fueron mayores que los negativos o sea mayores que los ocasionados por el retroceso de la válvula.

Al comparar las líneas relativas a las tres sucesiones se nota que la primera muestra una linealidad bastante aceptable, la segunda que demuestra histéresis en el dispositivo, también resulta lineal. En la línea última se aprecia un

menor comportamiento lineal ocasionado por el manejo alternativo que se tuvo en la válvula controladora de la presión, es decir se provocó en este caso la aparición de histéresis. Esta idea se comprueba con los resultados obtenidos en la gráfica (4.b). La línea representa puntos conseguidos al incrementar valores de presión sin efectuar ningún retroceso, también se hallan puntos -indicados con flechas verticales- que simbolizan una segunda evaluación similar a la primera, o sea aumentando y nunca retrocediendo la presión de aire. Es claro que esta gráfica da a conocer un comportamiento más lineal que el que pudiera evaluarse de una descripción compuesta con las gráficas (1) y (2).

En conclusión, después del análisis llevado a cabo con el conjunto de datos conseguidos, afirmamos que el comportamiento del transductor de presión construido era más que satisfactorio; y la histéresis que aparecía se debía al tubo de Bourdon, no a la lana de acero ni mucho menos a los ID.

### 5.3 Calibración estática con cuatro ID.

Sabiendo que el mecanismo lana de acero-tubo de Bourdon había mostrado linealidad con un ID, con cuatro también se comportaría lineal; además de ser más sensible. La curva de calibración con cuatro ID difiere de la obtenida con uno, puesto que los cambios de deformación en la lana son captados con mayor variación de resistencia en la serie de ID.

Se prosiguió a obtener una curva de igual manera que en la primera calibración, con el mismo sistema de registrar los cambios de presión con un indicador digital y con un ma

nómetro de referencia, el primero conectado al dispositivo transductor. También, se eliminaron los posibles esfuerzos residuales como anteriormente se explicó.

Se llevaron a cabo una serie de recorridos, a partir de cero hasta una presión de  $6 \text{ kg/cm}^2$ , y nuevamente retornando al punto inicial; en ninguno de los dos casos -llamados recorridos positivo y negativo- se permitieron movimientos cortos alternativos de la válvula que rompieran con la dirección (o secuencia) del ciclo. De los diferentes recorridos, sólo se evaluaron los que se consideraron habían sido realizados correctamente.

La gráfica (5) muestra un trayecto positivo, la flecha indica el sentido del proceso; como se puede apreciar se comprueba la linealidad del mecanismo-transductor; sólo aparece una desviación entre los valores de  $0.5$  y  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  que fue considerada. Se amplió ese intervalo para obtener la gráfica (6) con datos de otros recorridos (todos positivos), sin lugar a dudas en ese intervalo también permanece la linealidad que existe para valores mayores.

Una anotación importante es que en varias de las gráficas no aparecen valores pequeños, menores de  $0.4 \text{ kg/cm}^2$  por ejemplo; esto se debe a que la precisión en este intervalo en la lectura del manómetro de carátula -usado como referencia- no es buena, por ello se decidió no hacer evaluaciones entre  $0$  y  $0.4 \text{ kg/cm}^2$ .

El problema de histéresis aquí también se presentó, como se aprecia en la gráfica (7), la línea corresponde a la serie de datos de un recorrido positivo; independientes de ésta se hallan puntos a su alrededor obtenidos de otras dos

trayectorias, una positiva y la otra negativa, los de la primera se sitúan más próximos que los de la segunda. La desviación de los puntos conseguidos en el recorrido negativo, muestra una histéresis que como se afirmó anteriormente no es ocasionada por la lana de acero, sino -creemos- por la diferencia del tubo de Bourdon del manómetro de referencia, con respecto al del manómetro instrumentado, y la configuración del sistema utilizado para percibir las variaciones de presión.

Ya que la histéresis aparecida en nuestras gráficas suponemos únicamente proviene de los recorridos negativos, y para tener un análisis más objetivo del problema, se construyeron tres gráficas -gráfica (8)-: en la línea (1) se trata del ajuste de una curva con datos de recorrido positivo, asimismo, la línea (3) representa una serie de valores de trayectoria negativa. Como ya se anticipaba la línea (3) separa de la (1), y el área entre éstas señala la histéresis.

La línea dos reagrupa todos los datos registrados, aproximadamente 120; de los cuales el 70% pertenecen a secuencias positivas, de la gráfica (8) se nota que la línea intermedia se carga a la línea que representa estas secuencias.

Si el porcentaje de datos elegidos hubiese sido diferente y se hubieran obtenido más valores de secuencias negativas, la curva que se ajustara con todos los datos ahora se aproximarfa a la línea (3).

Desarrollando un análisis de la gráfica (8), consideremos las siguientes observaciones:

LÍNEA	PENDIENTE $\frac{1}{K}$	INTERSECCION EN ORDENADA $x=0$
(1)	$k = 65.98$	0.14156
(2)	$k = 65.72$	0.08297
(3)	$k = 65.99$	-0.00788

Las pendientes son muy semejantes entre sí, aún más la de la línea (1) respecto a la línea (3); la diferencia es de solamente 0.01  $\frac{\text{unidades digitales}}{\text{kg/cm}^2}$

La intersección de éstas con la ordenada de la gráfica muestra un corrimiento en relación al origen de los ejes:

0.14156 para la línea (1)  
-0.00788 para la línea (3)

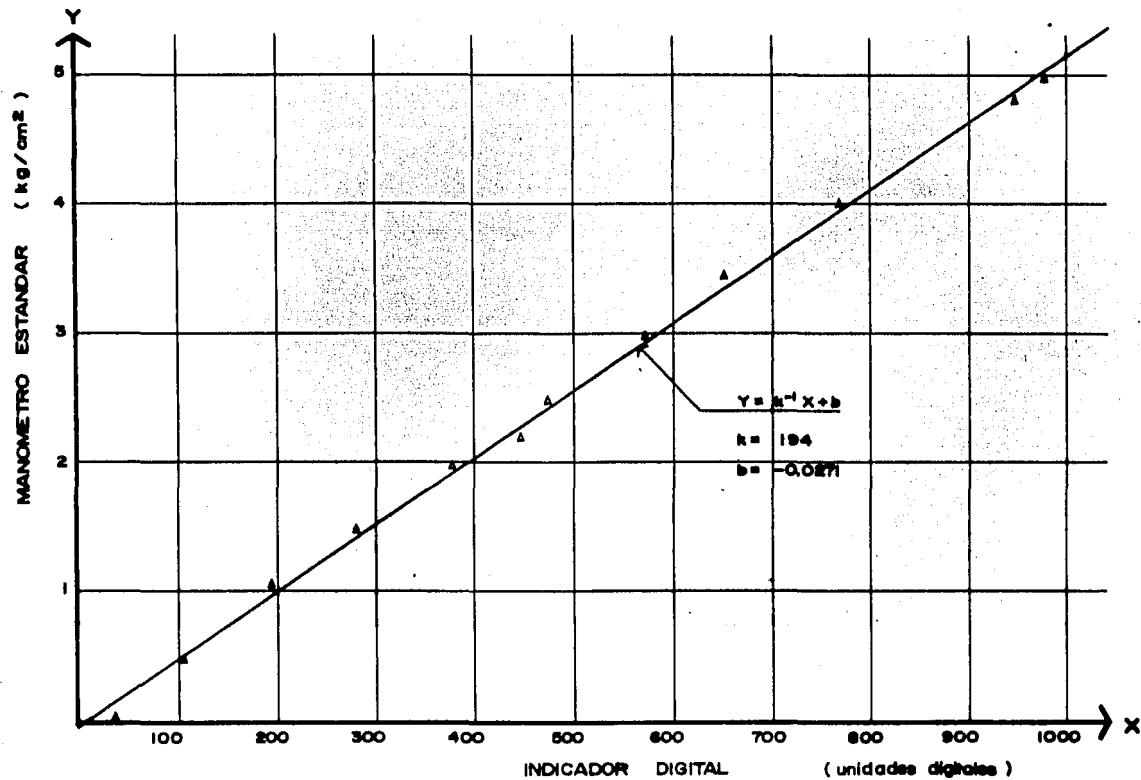
Prácticamente las curvas son las mismas y bien podrían ser si ambas se colocaran sobre el cruce de las coordenadas.

En la gráfica (9) aparece únicamente la línea (2), que puede utilizarse como curva de calibración cuando se tenga como objetivo conocer variaciones de presión y no precisamente valores exactos de presión absoluta. En este último caso, si se quiere obtener una calibración estática exacta, deberíamos de recurrir a sistemas de referencia muy confiables, como son los manómetros certificados o dispositivos que funcionan por medio de pesos muertos. Además de instalar un sistema de calibración mayormente adecuado.

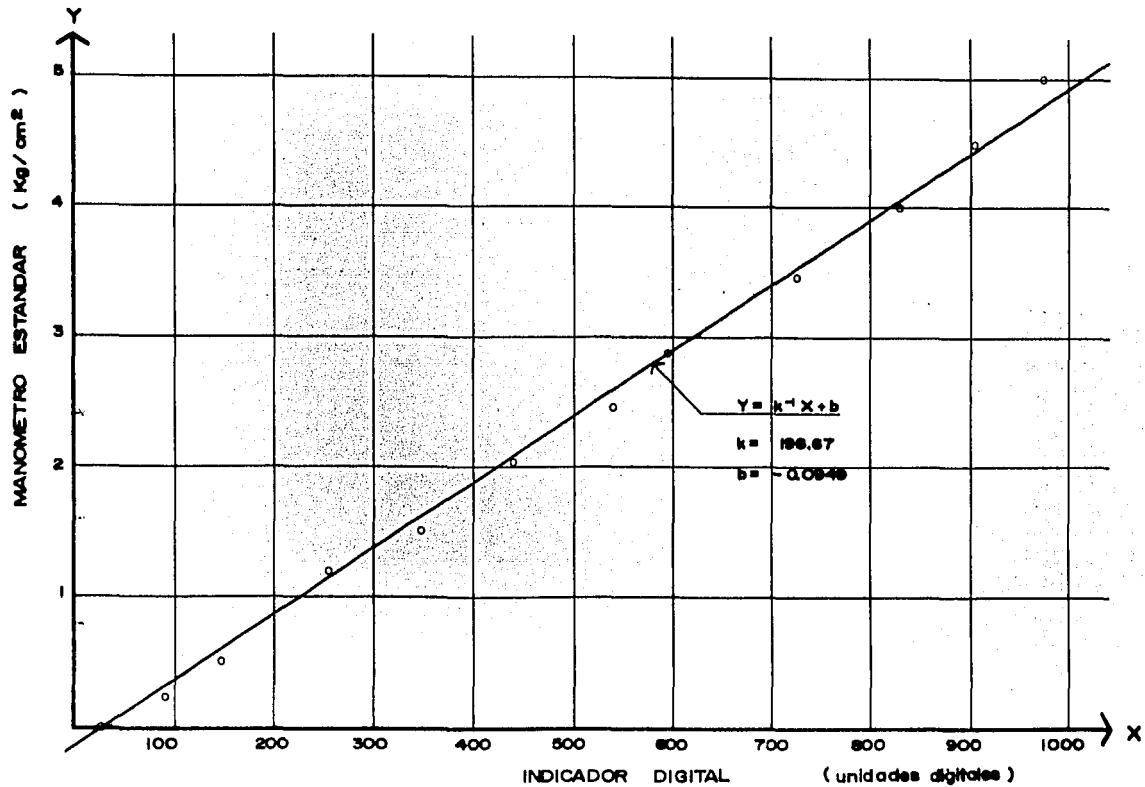
En este trabajo, lo anterior no se llevó a cabo por dos razones: la primera es que se pretendían conocer solamente cambios de presión en un sistema vapor-agua líquida:

y la segunda que por el momento no contamos con manómetros certificados o algún sistema calibrador de presión.

Sin embargo, la curva de calibración obtenida de recorridos positivos, podría asegurar una excelente referencia para cuando se utilice el dispositivo-transductor en la medición de presión de algún fluido.

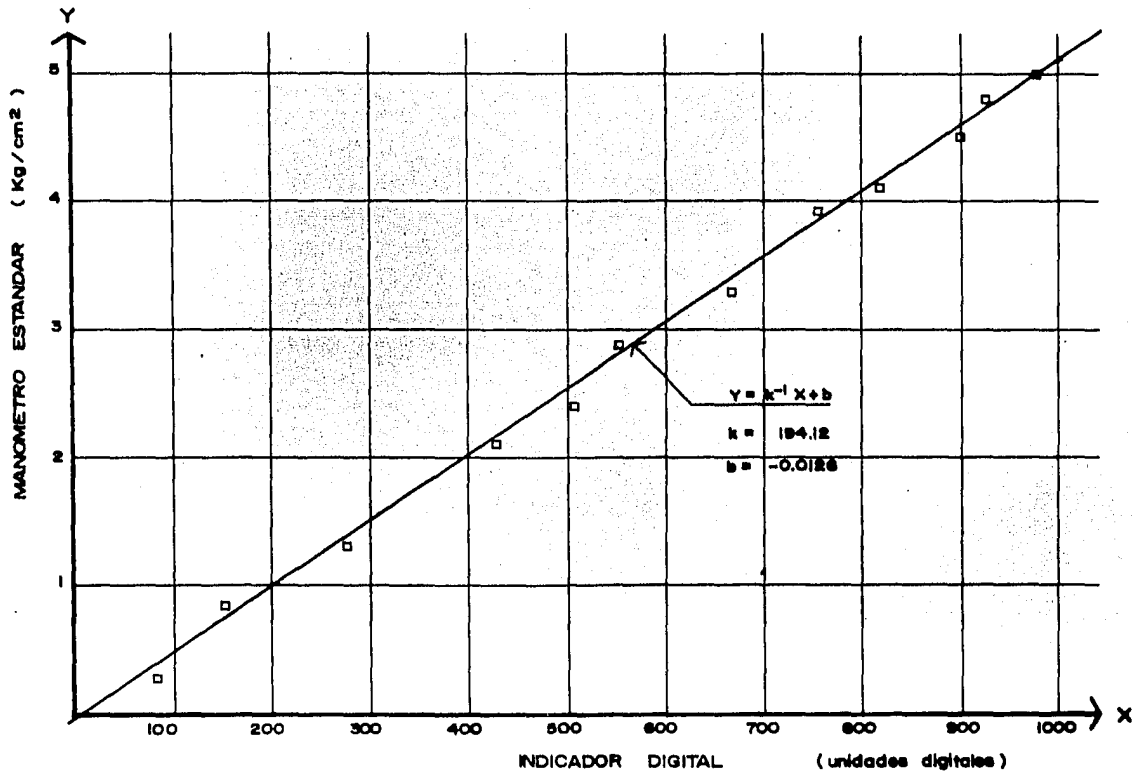


**GRAFICA I**  
**PRUEBA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION**

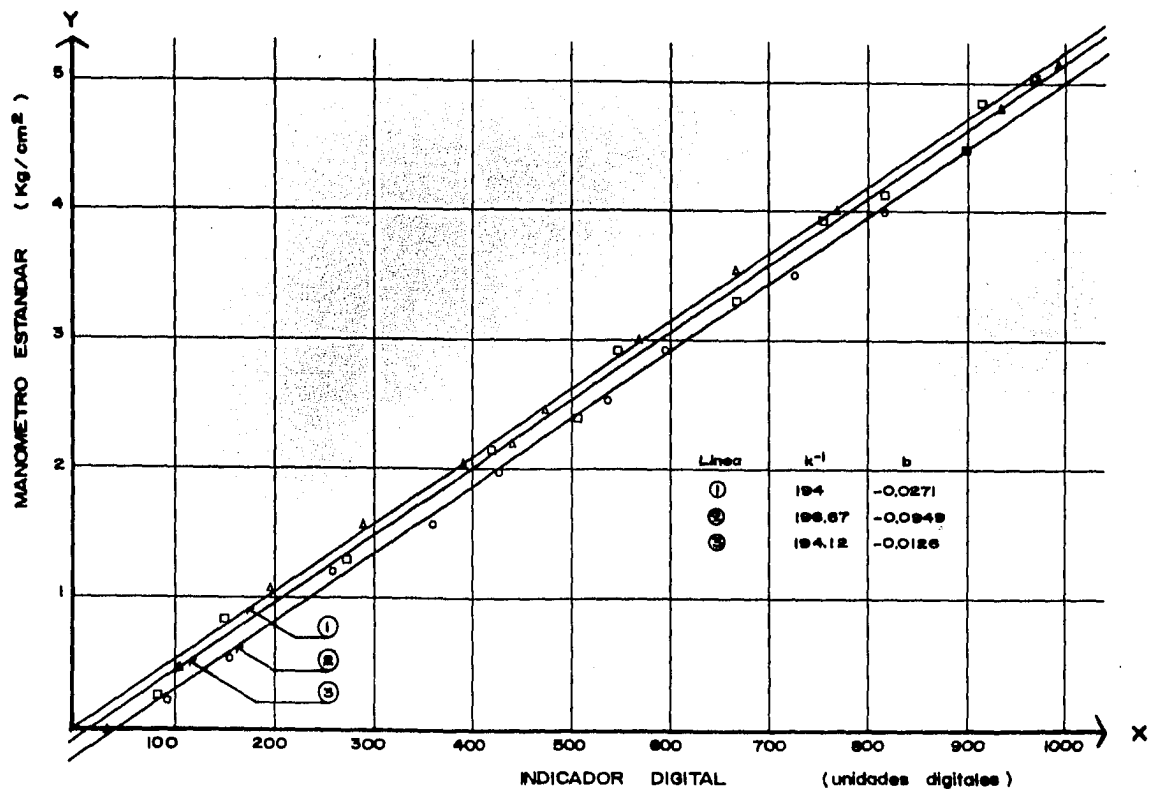


**GRAFICA 2**  
**PRUEBA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION**

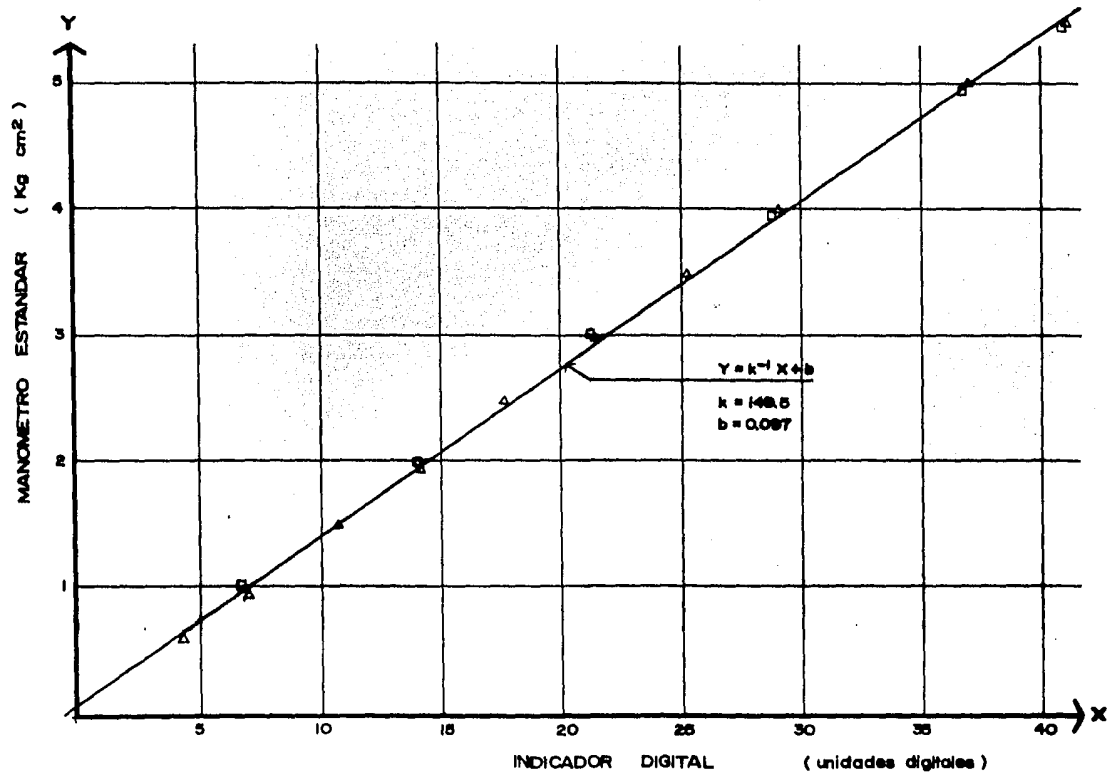




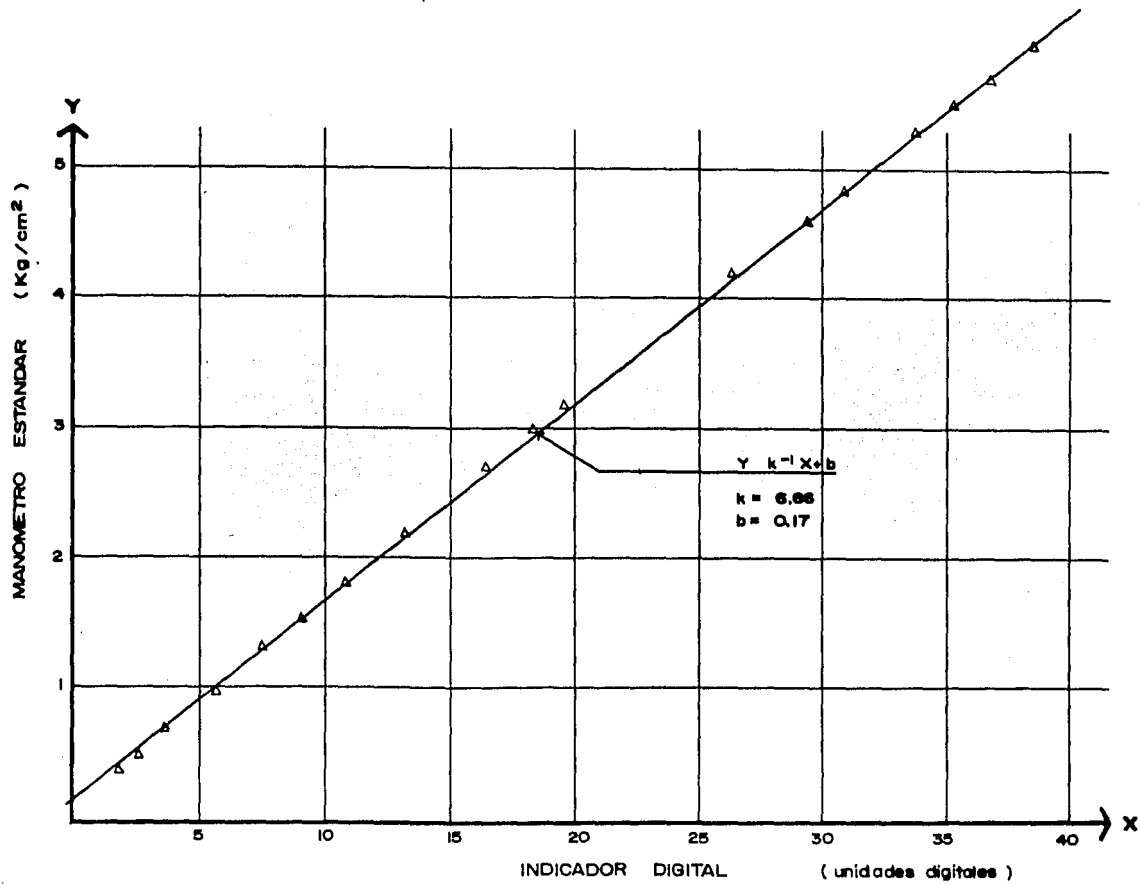
**GRAFICA 3**  
**PRUEBA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION**



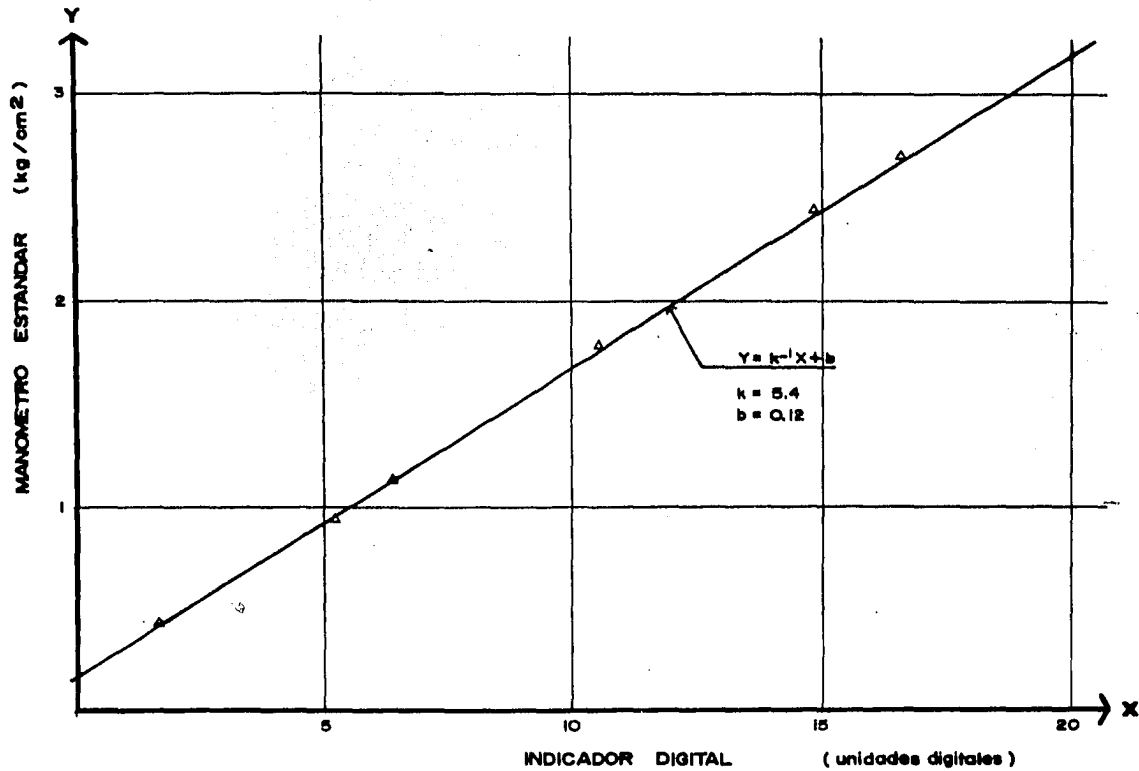
GRAFICA 4 a  
PRUEBA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION



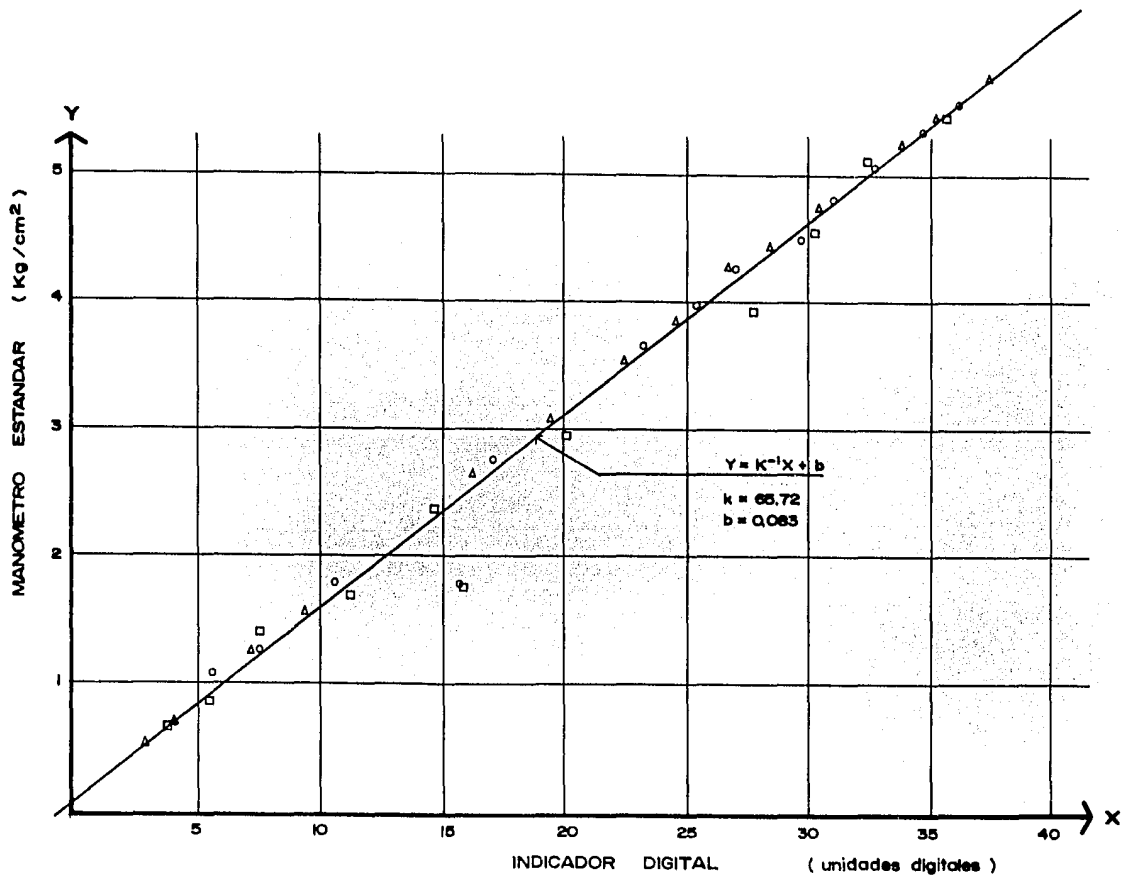
GRAFICA 4b  
PRUEBA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION



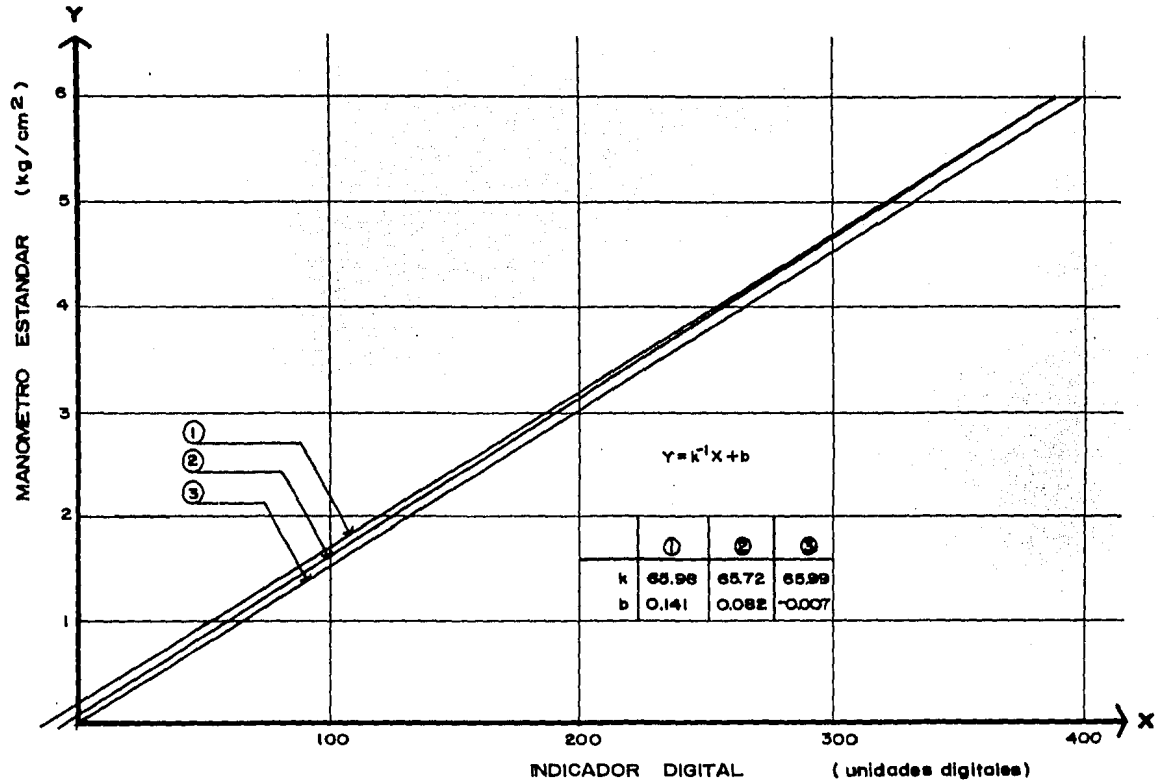
GRAFICA 5  
 PRUEBA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION



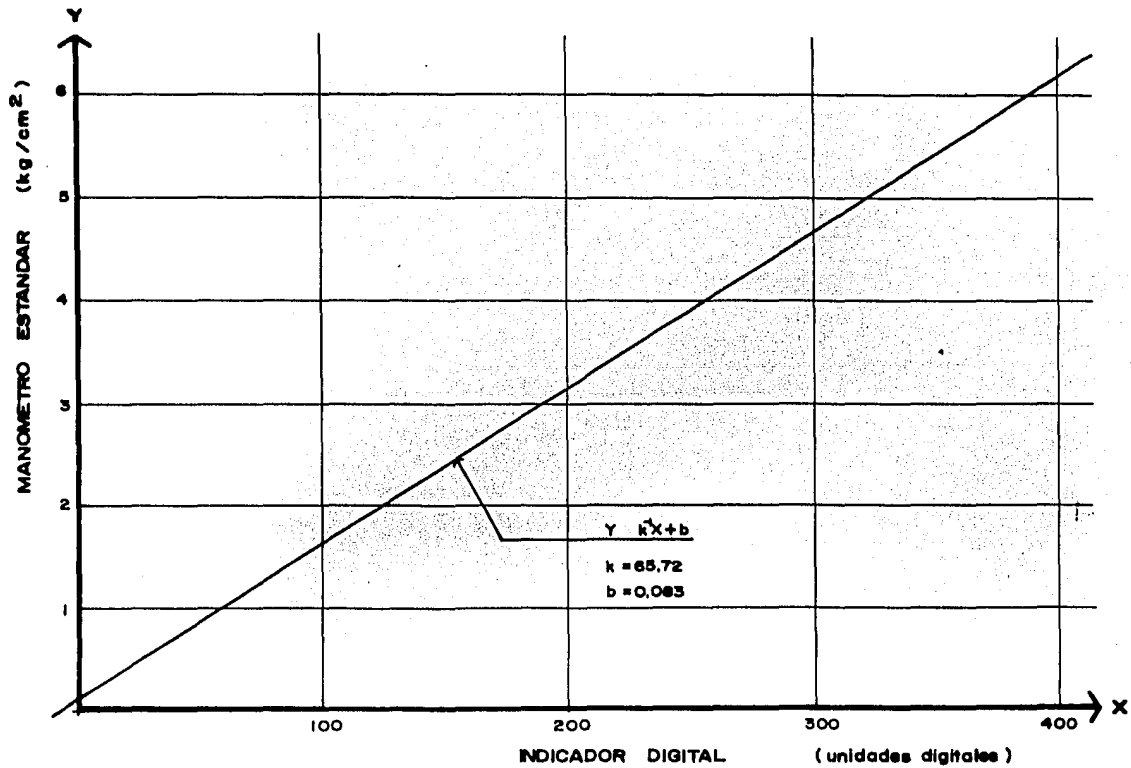
GRAFICA 6  
PRUEBA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION



GRAFICA 7  
 PRUEBA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION



GRAFICA 8  
PRUEBA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION



GRAFICA 9  
CURVA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION



## CAPITULO 6

### CARACTERISTICAS DINAMICAS

En el capítulo anterior se destacaron algunas de las características estáticas del transductor basado en la adaptación de ID (indicadores de deformación) sobre un tubo de Bourdon. Se conocieron valores de sensibilidad estática o derivada de la curva de calibración, linealidad, resolución, umbral, espacio muerto, etc., sin embargo fue de importancia relevante evaluar también las características dinámicas puesto que el dispositivo llevaría a cabo mediciones en transitorios de presión. Por tanto a continuación se presenta un análisis de las características dinámicas generales para un sistema, así como los resultados de las pruebas dinámicas realizadas sobre el transductor de presión construido.

#### 6.1 Generalidades

La naturaleza transitoria de una gran parte de los fenómenos físicos requiere de instrumentos que logren registrar las variaciones -de alguna propiedad- ocurridas en pequeños intervalos de tiempo, para así poder evaluar y/o caracterizar el fenómeno de manera específica.

La peculiaridad de cualquier transductor\* (no únicamente de presión sino también de transductores de fuerza

\* El concepto de transductor queda aquí limitado a dispositivos que transfieren una señal del tipo físico al tipo electrónico, como lo es una señal de voltaje.

aceleración, etc.) es ofrecer la posibilidad de que sea grabada la señal de salida con algún dispositivo como un osciloscopio, un graficador, una grabadora galvométrica, o un sistema de almacenamiento digital auxiliado por un convertidor analógico-digital.

Al quedar la señal registrada en forma "permanente", se puede analizar con detalle el comportamiento del fenómeno que ocurrió en un breve período de tiempo; sin embargo aparece una pregunta importante ¿Cómo podemos saber que un transductor responde con un tiempo suficientemente rápido para poder sensar señales transitorias? La contestación la conocemos al obtener las características dinámicas del propio transductor.

Para el caso del transductor de presión construido y en general para cualquier otro, son las partes mecánicas las que impiden tener un buen sistema de medición, es decir la rapidez de respuesta estará en función del sistema mecánico del dispositivo. Por ejemplo si el sistema es un tanto rígido (no-flexible) respecto a la señal de entrada, el desplazamiento mecánico será pequeño y por tanto la sensibilidad del dispositivo-medidor será baja; por otro lado la frecuencia de resonancia se incrementará con la rigidez. A su vez el tamaño del dispositivo que se relaciona directamente con la inercia del mismo afecta a la sensibilidad y a la frecuencia natural; al aumentar el tamaño por lo general se mejora la sensibilidad pero se disminuye la rapidez de la respuesta. Las ideas mencionadas dejan entrever la importancia de la dinámica de sistemas físicos y por ello, en forma concisa, se presentan en los párrafos siguientes los conceptos esenciales de tal materia.

## 6.2 Sistemas de 1° y 2° orden

Para el estudio de la respuesta dinámica de los sistemas de medición aplicados en distintas áreas de ingeniería (teoría de circuitos, teoría de control, teoría de vibración, etc.) se utiliza un modelo matemático generalizado consistente en una ecuación diferencial lineal ordinaria:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (6.1)$$

donde:

$x$  = valor de la variable de entrada

$y$  = valor de la variable de salida

$t$  = tiempo

$a$  y  $b$  con subíndice son constantes y son una combinación de los parámetros físicos del sistema.

La solución de la ecuación (6.1) puede realizarse a través de varios métodos, utilizando p. ejemplo el del operador  $D$  o el de la transformada de Laplace (ref. S.L. Ross)

Cuando se estudie un sistema se le asigna un orden según el mismo orden de la ecuación matemática que lo modela, así tenemos sistemas comunes de cero, primero y segundo órdenes.

### Sistema de orden cero

A un instrumento de orden cero correspondería la ecua-

ción siguiente:

$$a_0 y = b_0 x \quad \text{ó} \quad y = k x \quad (6.2)$$

donde

$$K = \frac{b_0}{a_0} = \text{sensibilidad estática}$$

La ec. (6.2) es una ecuación algebraica, y se observa que no importando que  $x$  varíe con el tiempo,  $y$  seguirá siempre fielmente sin distorsión a la variable de entrada. Cualquier instrumento de este tipo representa un comportamiento dinámico ideal, y el ejemplo podría ser un potenciómetro (formado por una fuente de voltaje y una resistencia variable).

### Sistema de 1er. orden

Para un sistema de primer orden tenemos la ec. (6.1) reducida a:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (6.3)$$

Si se tratara de un instrumento de medición se define

$$K = \frac{b_0}{a_0}, \text{ sensibilidad estática y}$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} = \text{constante de tiempo}$$

se acostumbra en la Dinámica de Sistemas físicos mecánicos decir que:

$$a = b \quad ; \quad a_0 = k \quad ; \quad b_0 = c_0$$

y las constantes son:

$b$  = constante de amortiguamiento (traslacional)

$k$  = constante de elasticidad (traslacional)

Luego, la ec. (6.3) queda:

$$bd \frac{y(t)}{dt} + ky(t) = c_0 x(t) \quad (6.4)$$

la solución a la ecuación consiste en una solución homogénea y otra complementaria (términos matemáticos) o respuesta libre (respuesta natural) más otra particular del sistema modelado.

En un dispositivo de este orden, la señal de salida puede ser que no siga a la entrada, todo ello dependerá de su constante de tiempo  $\tau$ , y de la variación que tenga la señal de excitación. La respuesta libre será una señal exponencial decreciente, si el valor de  $\tau$  es pequeño tendremos que la exponencial inicia con una pendiente grande y si  $\tau$  es grande a la exponencial se extenderá longitudinalmente.

Un instrumento que muestra un comportamiento muy cercano al de primer orden es el termopar (no importa que tenga o no el sensor aislado).

Ahora bien, respecto al transductor de presión construido, se experimentó después de ciertas pruebas que su comportamiento se podía asemejar al de un sistema de segundo orden. Las pruebas que se llevaron a cabo fueron la de respuesta libre, respuesta a la frecuencia y respuesta a una señal impulso; más adelante se presentará con detalle la manera en que se llevaron a cabo, pero antes en las líneas siguientes se da a conocer una síntesis de la teoría general del sistema de segundo orden referido a un instrumento, mostrando únicamente las soluciones de su ecuación-modelo correspondientes a las respuestas mencionadas. Con esto se quiere tener una base teórica para analizar los resultados de las pruebas experimentales, y así hacer una comparación que nos guíe a emitir un criterio sobre las características del dispositivo-transductor.

### Sistema de 2° orden

Un sistema de segundo orden lo modela una ecuación reducida de la ec. (6.1):

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{d y(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (6.5)$$

colocando los parámetros de un sistema mecánico

$$a_2 = m \quad ; \quad a_1 = b \quad ; \quad a_0 = k \quad ; \quad b_0 = c_0$$

y  $m$  = masa del sistema mecánico

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{b dy(t)}{dt} + ky(t) = c_0 x(t) \quad (6.6)$$

#### 1. Respuesta libre (o movimiento natural)

Este es el caso de un movimiento no-forzado, únicamente aparece debido a la energía del sistema en un estado inicial. Por tanto la ec. (6.6) es:

$$\text{para } x(t) = 0$$

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{b dy(t)}{dt} + ky(t) = 0 \quad (6.7)$$

cuya ecuación característica es:

$$mS^2 + bS + k = 0$$

al agrupar los parámetros se tiene:

$$S^2 + 2\alpha S + \omega_0^2 = 0 \quad (6.8)$$

donde

$$2\alpha = \frac{b}{m} \quad ; \quad \alpha = \text{constante de amortiguamiento}$$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad ; \quad \omega_0 = \text{velocidad angular de oscilación no amortiguada (frecuencia natural no amortiguada)}$$

Las raíces de la ec. (6.8) son:

$$S_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

$$S_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

valores característicos de un sistema de segundo orden.

Definamos otros parámetros:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \quad ; \quad \text{velocidad angular de oscilación amortiguada (frecuencia natural amortiguada)}$$

$$\zeta = \frac{\alpha}{\omega_0} \quad ; \quad \text{radio } \rho \text{ promedio de amortiguamiento}$$

que indica la atenuación relativa del sistema, también, el inverso de  $\zeta$  es:

$$\tau = \frac{1}{\alpha} \quad ; \quad \text{constante de tiempo de amortiguamiento.}$$

que indica el tiempo requerido para que el movimiento del sistema sea amortiguado hasta el 36.78% de su valor inicial.



En función del valor de los parámetros del sistema hallaremos raíces reales, imaginarias o complejas. Así tenemos que:

1. si  $\alpha > \omega_0$  raíces reales distintas
2. si  $\alpha = \omega_0$  raíces reales iguales
3. si  $\alpha < \omega_0$  raíces complejas conjugadas
4. si  $\alpha = 0$  raíces imaginarias conjugadas

Si reorganizamos las ecuaciones a través de las cuales se obtienen los valores característicos  $S_1$  y  $S_2$ :

$$S_{1,2} = \alpha \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{\zeta^2}} \right)$$

vemos que:

$$\text{si } \zeta > 1 \quad (\text{caso 1, } \alpha > \omega_0)$$

$$S_1 = \alpha \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{1}{\zeta^2}} \right)$$

$$S_2 = \alpha \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\zeta^2}} \right)$$

$$\text{si } \zeta = 1 \quad (\text{caso 2, } \alpha = \omega_0)$$

$$S_1 = S_2 = \alpha$$

$$\text{si } \zeta < 1 \quad (\text{caso 3, } \alpha < \omega_0)$$

$$S_1 = -\alpha + j\omega \quad (j = \sqrt{-1})$$

$$S_2 = -\alpha - j\omega$$

si  $\zeta = 0$  (caso 4,  $\alpha=0$ )

$$S_1 = j\omega$$

$$S_2 = -j\omega$$

La solución de la ecuación (6.8) para los 4 casos anteriores son respectivamente:

$$- y(t) = c_1 e^{-S_1 t} + c_2 e^{-S_2 t} \quad t > 0 \quad ; \quad (\zeta > 1) \quad (6.9)$$

donde

$$c_1 = \frac{S_2 Y_0 + \dot{Y}_0}{S_2 - S_1} \quad ; \quad c_2 = - \frac{S_1 Y_0 + \dot{Y}_0}{S_2 - S_1}$$

$$- y(t) = y_0 (1 + \alpha t) e^{-\alpha t} + \dot{y}_0 t e^{-\alpha t} \quad ; \quad (\zeta = 1) \quad (6.10)$$

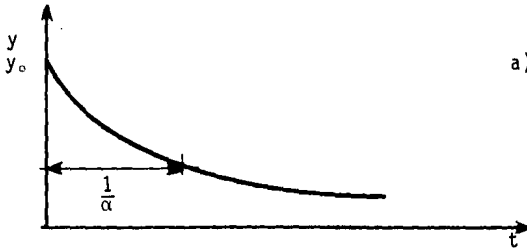
$$- y(t) = e^{-\alpha t} (c_1' e^{j\omega t} + c_2' e^{-j\omega t}) = c_3 e^{-\alpha t} \cos(\omega t - \psi) \quad ; \quad (\zeta < 1) \quad (6.11)$$

donde

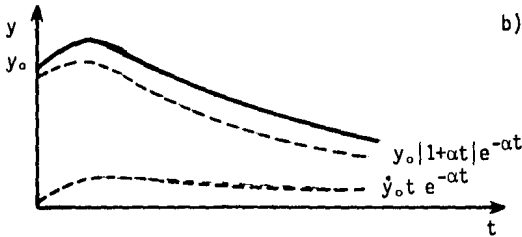
$$c_3 = \frac{|\frac{\alpha}{\omega} y_0 + \frac{Y_0}{\omega}|^2 + y_0^2}{\omega} \quad ; \quad \psi = \tan^{-1} \left| \frac{\alpha}{\omega} + \frac{\dot{Y}_0 / \omega}{y_0} \right|$$

$$- y(t) = y_0 \cos(\omega t - \psi) \quad ; \quad (\zeta = 0) \quad (6.12)$$

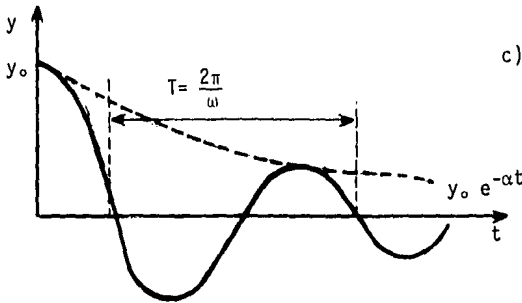
considerando:



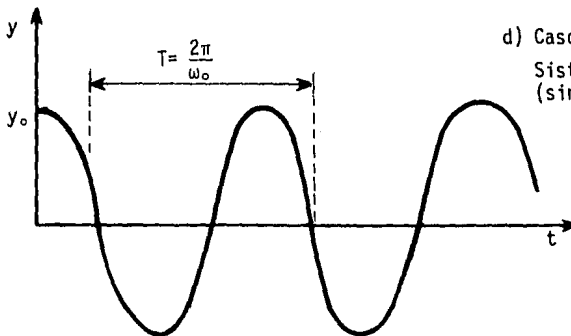
a) Caso 1.  
Sistema sobreamortiguado  
(exponencial pura)



b) Caso 2  
Sistema críticamente amortiguado



c) Caso 3  
Sistema subamortiguado  
(sinusoidal amortiguada)



d) Caso 4  
Sistema no-amortiguado  
(sinusoidal pura)

Fig. 6.1 Respuesta libre de un sistema de 2° orden

$$y_0 = y(0),$$

$$\dot{y}_0 = \frac{dy(0)}{dt}, \quad \text{condiciones iniciales}$$

Las soluciones gráficas se presentan en la Fig. 6.1

## 2. Respuesta a un impulso

Una señal impulso  $\delta(t)$ , es una excitación ocurrida en un tiempo muy breve pero con una amplitud significativa. La magnitud de un impulso esta definida como el área bajo la curva obtenida en una gráfica excitación-tiempo ( $x(t)-t$ )

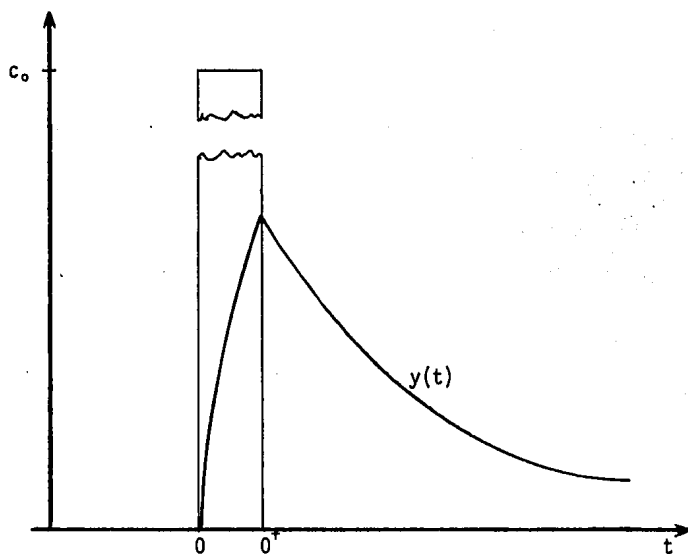


Fig. 6.2 Respuesta a un impulso

A pesar de que no es común que en los problemas físicos ocurran señales impulsivas de entrada, su estudio se considera especialmente atractivo en la dinámica de sistemas físicos, puesto que eslabona el análisis del movimiento natural con el del movimiento forzado (admite ver el primero como un caso del segundo), además de permitir que se encuentre la respuesta a una serie de señales de entrada (o excitación) arbitrarias por completo.

En el segundo caso de un sistema de 2° orden la ec. (6.6) queda para  $x(t) = \delta(t)$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dy}{dt} + \frac{k}{m} y = \frac{c_0}{m} \Delta T \delta(t) \quad (0 < t < 0^+)$$

cuya solución a la respuesta libre bajo las condiciones  $\dot{y}(0^+) = \frac{c_0 \Delta T}{m}$  y  $y(0^+) = 0$  según ecs. (6.9), (6.10) y (6.11) respectivamente.

$$y(t) = h(t) = c_i \frac{e^{-S_1 t} - e^{-S_2 t}}{S_2 - S_1} \quad \zeta > 1$$

$$y(t) = h(t) = c_i e^{-\alpha t} \quad \zeta = 1$$

$$y(t) = h(t) = \frac{c_i}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad \zeta < 1$$

donde:

$$c_i = \frac{c_0 \Delta T}{m} \quad h(t) \quad \text{para precisar que la respuesta es válida para } t > 0.$$

Cuando se tiene una función arbitraria de entrada en un sistema, ésta se puede representar por una suma de impulsos consecutivos, y la respuesta del sistema lineal a tal excitación será la superposición de las respuestas a los impulsos individuales. Este método de solución a señales de entrada arbitrarias se denomina convolución.

### 3. Respuesta a una sinusoidal

La respuesta de un sistema a una señal de entrada sinusoidal eléctrica sobre un rango de frecuencias se denomina respuesta a la frecuencia, mientras que la respuesta de un sistema mecánico a señales sinusoidales mecánicas generalmente se nombra vibración forzada, y ambas son de gran valor para el estudio dinámico del sistema.

Cuando se aplica una sinusoidal a la respuesta del sistema será -después de ocurrir el efecto transitorio y mantener una respuesta en estado estable- también una senoide con igual frecuencia, que sin embargo podrá estar desfasada y tener una amplitud menor. Lo anterior determina que para conocer la correspondencia entre la señal de entrada y salida se debe encontrar únicamente su relación en amplitud y el desfase. Ahora bien, estos dos parámetros generalmente varían cuando la frecuencia de la excitación se modifica; la vibración forzada (o respuesta a la frecuencia) de un sistema mostrará a través de gráficas por ejemplo, los valores de relación de amplitud y de desfase entre la entrada y salida, ambos en función de la frecuencia de entrada. Sobre estas gráficas se hará un mayor análisis en subsiguientes páginas.

La ecuación característica de (6.6) es:

$$(m S^2 + bS + k) Y = c_o X \quad (6.8a)$$

donde ahora

$$y(t) = Y e^{St}$$

$$x(t) = X e^{St}$$

se puede escribir (6.12) como:

$$\frac{Y}{X} = \frac{C_o}{(mS^2 + bS + k)}, \text{ función de transferencia (6.13)}$$

si la señal de entrada (excitación) es una sinusoidal como

$$x(t) = \cos \omega_f t \quad \text{donde } \omega_f = \text{frecuencia de excitación de la señal forzada}$$

$$r = e^{j\omega_f t} = e^{St}$$

por lo que

$$X = 1$$

se obtiene un arreglo de la ec. (6.13) al sustituir:

$$S = j\omega_f, \quad (j = \sqrt{-1}):$$

$$Y = \frac{C_o}{-m \omega_f^2 + j b \omega_f + k} \quad (6.14)$$

r: significa que el término a la izquierda de la ecuación es igual a la parte real del término a la derecha.

La solución a la ecuación (6.14) es

$$y = y_m \cos(\omega_f t + \psi_f) \quad ; \quad \text{donde:}$$

$$\frac{y_m}{c_o} = \left| \frac{1}{-m\omega_f^2 + j b\omega_f + k} \right| = \left| \frac{1/k}{\left| 1 - \left(\frac{\omega_f}{\omega_o}\right)^2 + j 2\zeta \frac{\omega_f}{\omega_o} \right|} \right| =$$

$$\boxed{\frac{y_m}{c_o/k} = \frac{1}{\left| \left| 1 - \left(\frac{\omega_f}{\omega_o}\right)^2 \right|^2 + \left(2\zeta \frac{\omega_f}{\omega_o}\right)^2 \right|}} \quad (6.15)$$

y

$$\boxed{\psi_f = -\tan^{-1} \frac{b\omega_f}{k - m\omega_f^2}} \quad (6.16)$$

La ecuación (6.15) indica la relación entre amplitudes de salida y entrada. La ec. (6.16) es el ángulo de desfase entre salida y entrada -nuevamente-. En las Figs. 6.3 y 6.4 están graficadas las anteriores ecuaciones para distintas relaciones de amplitud, desfaseamiento y frecuencia.



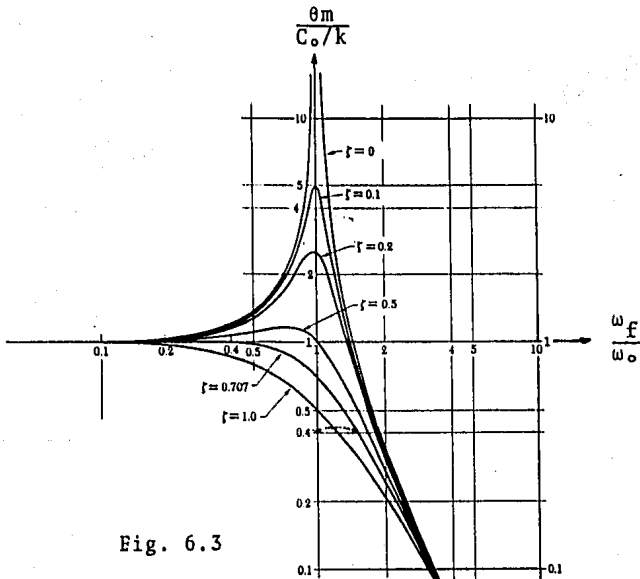


Fig. 6.3

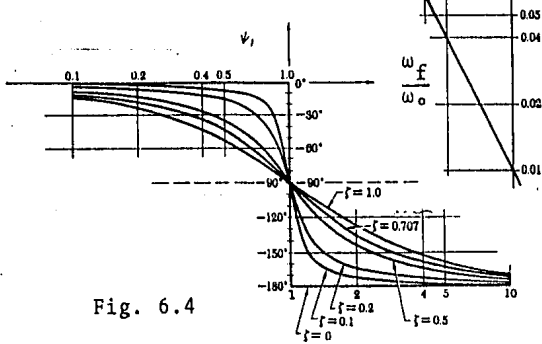


Fig. 6.4

Respuesta a la frecuencia para un sistema de 2° orden.

### 6.3 Identificación de la dinámica del dispositivo-transductor.

En el precedente subcapítulo se hizo ver una síntesis de la dinámica de sistemas físicos, que ha tenido como fin dejar bien claro los conceptos esenciales requeridos en el estudio del comportamiento dinámico del transductor de presión concebido.

Toca ahora mostrar los resultados de las pruebas (o experimentos) realizados con el transductor medidor de presión que tuvieron por objeto identificar algunos de los parámetros dinámicos.

De especial importancia resultan las pruebas de res puesta libre que se detallarán en posteriores párrafos, pero antes definamos las variables de entrada y salida de nuestro sistema, y que también precisamos para fines de estudio dinámico.

#### Entrada-Salida del Sistema de transducción

El sistema de transducción consiste en un tubo de Bourdon, un sistema de relojería -del manómetro de carátula- y la laminilla de acero. El sistema de relojería que se utiliza para registrar el movimiento (o desplazamiento) del extremo final del tubo de Bourdon, también cumple con otra función muy importante: la de un resorte que permite retornar al tubo de Bourdon a su estado inicial después de haber sido excitado con la presión de algún fluido, por ello, aunque la función de la aguja indicadora sobre la carátula del manómetro halla sido susti-

tuida por el sistema de lana de acero -ID (indicadores de deformación) como evaluador de la señal de presión de entrada, no fue posible eliminar del manómetro tal arreglo de relojería.

La entrada al sistema de transducción consiste en una señal de presión aplicada al principio del orificio de acceso al tubo de Bourdon con que cuenta el manómetro de carátula.

La salida del sistema se considera que es un desplazamiento ocurrido del tubo de Bourdon debido a la excitación de presión. Ese desplazamiento es seguido fielmente\* por la deformación de la lana acoplada, por lo cual al medir la deformación de los ID estamos evaluando la señal mecánica de salida del dispositivo transductor.

Hasta el momento han quedado definidos el sistema mecánico y la entrada-salida del mismo, sin embargo hay una idea que es importante no soslayar; se trata del papel que el propio fluido juega en el sistema; sabemos que la presión del fluido será excitadora, pero éste tiene una masa, una constante de elasticidad y ofrece cierto amortiguamiento en algunos casos, por lo tanto podría formar parte del sistema.

Para aclarar esta idea imaginemos dos tubos de Bourdon idénticos, a uno de ellos le aplicamos una presión

\* hipótesis que se analizará con mayor cuidado en posteriores páginas

de aire en su espacio interior y al otro una presión de agua del mismo valor que la primera. La pregunta es ¿Cómo responderán los tubos de Bourdon para cada uno de los casos? Es muy posible -según las condiciones que el fluido aire alojado en la cavidad del tubo amortigue la propia señal de entrada debido a su elasticidad, todo dependerá de la frecuencia de la excitación y del volumen de la cavidad del tubo de Bourdon. Por otra parte en el caso del fluido agua puede ser importante su inercia si la velocidad del mismo y los elementos elásticos del sistema son rápidos; una inercia grande sería equivalente a aumentar la masa del tubo de Bourdon con lo cual la frecuencia natural disminuiría.

Para nuestro caso, podemos afirmar que el dispositivo transductor es un sistema fuertemente amortiguado como veremos más adelante; la inercia de un líquido, no será considerable para modificar el valor de una frecuencia natural obtenida por ejemplo para aire.

También, puesto que el volumen del tubo de Bourdon y el del orificio de la base del manómetro que da acceso al propio tubo son pequeños, se debe pensar que el fluido aire se mueve como un solo ente en el interior del tubo de Bourdon sin existir compresión, por lo cual no existirá amortiguamiento en el sistema causado por un fluido diferente al de un líquido.

Enunciado lo anterior, continuaremos nuestro estudio con las pruebas llevadas a cabo.

## Pruebas de respuesta libre

### 1. Instrumentación

Para efectuar las mediciones de respuesta libre del transductor se utilizó un osciloscopio con memoria, para lograr un registro permanente de la señal de salida del dispositivo. Al hacer uso del osciloscopio fue necesario amplificar y filtrar la señal. En la Fig. 6.5 aparece un diagrama que muestra la instrumentación que se llevó a cabo.

La amplificación se realizó con un amplificador operacional cuya ganancia es 10, y tuvo como finalidad obtener un registro más amplio de las pequeñas variaciones de la señal de salida del puente formado por los indicadores de deformación, sin embargo, con la amplificación de esta señal pura también fueron ampliadas señales de interferencia, por lo cual se requirió agregar filtros al sistema de instrumentación.

El voltaje a la salida del puente de Wheatstone tiene un rango de -2.5 mvolts a +15 mvolts que es el rango correspondiente a la presión del transductor, es decir de cero a 6 kg/cm<sup>2</sup>. Los valores de voltaje hubieran sido perfectamente registrados con el osciloscopio sin necesitar la amplificación y el filtrado, pero, puesto que en esos valores aparecen interferencias no lo fue posible.

### 2. Método y resultados

Habiendo instrumentado el transductor de presión se

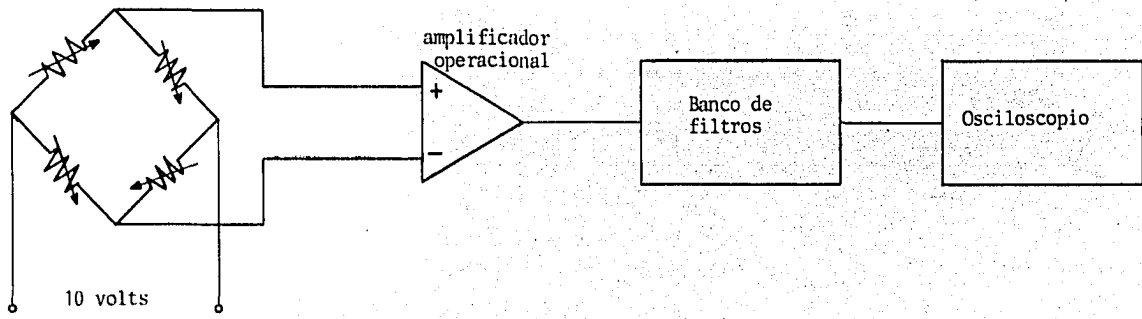


Fig. 6.5 Diagrama de instrumentación del transductor de presión

prosiguió a la obtención de la respuesta libre o respuesta debida a la energía propia del sistema. El método consistió en tener un valor inicial de salida, es decir un desplazamiento inicial del tubo de Bourdon, provocado en este caso, al girar la aguja indicadora del manómetro de carátula y mantenerla inmóvil en cierto ángulo de giro. Después repentinamente dejar que la aguja retornara libremente, o sea que el tubo de Bourdon tuviera de nueva vez su posición original pasiva sin forzar alguna señal de entrada (o excitación).

Es oportuno hacer la aclaración que en el momento de soltar la aguja indicadora puede existir un pequeño tiempo muerto -debido al sistema de relojería del manómetro- entre dicho momento y el tiempo al cual responde el propio tubo de Bourdon del manómetro; no obstante, el tiempo inicial en el registro del osciloscopio está referido al inicio del desplazamiento del tubo y no al de la aguja indicadora, por lo que es perfectamente válido provocar una señal de salida del sistema a través del movimiento de la aguja. Además, en un sentido riguroso se puede argumentar que el sistema de relojería es biunívoco y por lo tanto a una posición de la aguja corresponde sólo una posición del tubo de Bourdon y viceversa.

Se llevaron a efecto varias pruebas con distintos valores iniciales de las cuales se hizo una selección, así por ejemplo tenemos en las Figs. 6.6 y 6.7 dos pruebas con similares valores iniciales pero con distintos tiempos de registro en el osciloscopio.

La fotografía presentada en la Fig. 6.7 permite describir claramente que el sistema transductor de presión

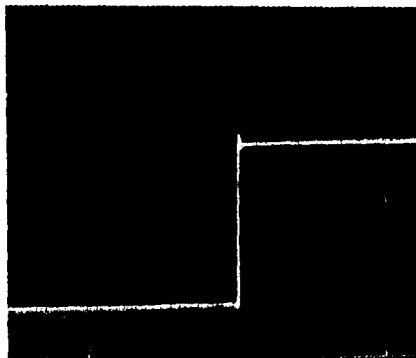


Fig. 6.6 Respuesta del transductor  
(volts = 50 mv/div ; t = 1 seg/div)

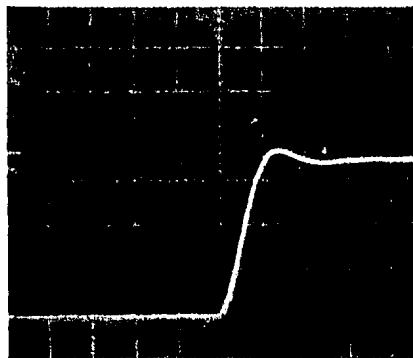


Fig. 6.7 Respuesta libre del transductor  
(volts = 50 mv/div ; t = 50 m seg/div)

NOTA: div significa división de la pantalla del osciloscopio.



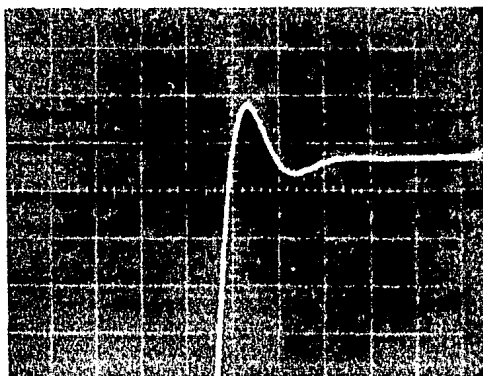


Fig. 6.8 Respuesta libre del transductor  
(Amplificación de la sinusoidal)  
(volts 10 mv/div ; t = 0.5 seg/div)

se comporta análogamente a un sistema dinámico de segundo orden, y por las características de la curva del gráfico afirmamos que se trata de un sistema subamortiguado (véase Fig. 6.1.c).

Ambas gráficas representan, sobre el eje de abscisas el tiempo transcurrido y en las ordenadas la señal de voltaje de salida del puente de Wheatstone (configurado por los cuatro indicadores de deformación) amplificada y filtrada.

Una amplificación de la sinusoidal amortiguada identificada en la Fig. 6.7 se presenta en la fotografía de la Fig. 6.8. De las Figs. 6.7 y 6.8 es factible obtener la frecuencia natural amortiguada ( $\omega$ ) del sistema -según lo visto en el subcapítulo 6.2. Asimismo se puede obtener la constante de amortiguamiento ( $\alpha$ ) a partir de la exponencial que pasa por los puntos superiores de las sinusoidales aparecidas (véase Fig. 6.1.c.); con  $\omega$  y  $\alpha$  se obtendría la frecuencia natural no amortiguada ( $\omega_0$ ) y el tiempo de respuesta del sistema ( $\tau$ ).

El valor de  $\omega$ , obtenido de la Fig. 6.7 es de 20 c.p.s., aproximadamente, es decir  $126 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ . Para obtener  $\alpha$  recurrimos -repetimos- a la Fig. 6.1.c., vemos que la sinusoidal es amortiguada en poco tiempo (véase Fig. 6.7)  $(3.2) \times (50 \times 10^{-3})$  segs., por lo tanto el valor de la constante de amortiguamiento debe ser grande para que la señal tome su valor final o sea para que la ecuación que define a la exponencial se haga cero. Luego si hemos definido que el tiempo de respuesta es el inverso a la constante  $\alpha$  (subcapítulo 6.2 (1)), la constante de tiempo debe ser pequeña. Tam-

bién como la frecuencia natural no-amortiguada ( $\omega_0$ ) es la raíz de la suma de  $\omega^2$  y  $\alpha^2$  ( $\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \alpha^2}$ ), entonces  $\omega_0$  tiene un valor grande.

Obtener cuantitativamente la exacta  $\alpha$  podría llevarnos a un error sino utilizamos una buena aproximación de la línea exponencial que sobrepusiéramos en la senooidal de la Fg. 6.8 -como ya se explicó-. No basta la amplitud con que aparece la senoide amortiguada para marcar correctamente sobre ella una exponencial. Ello nos hace pensar en que la aproximación que hemos hecho para nuestro transductor como sistema de segundo orden es buena, pero no suficiente, para conocer cuantitativamente los valores de los parámetros restantes.

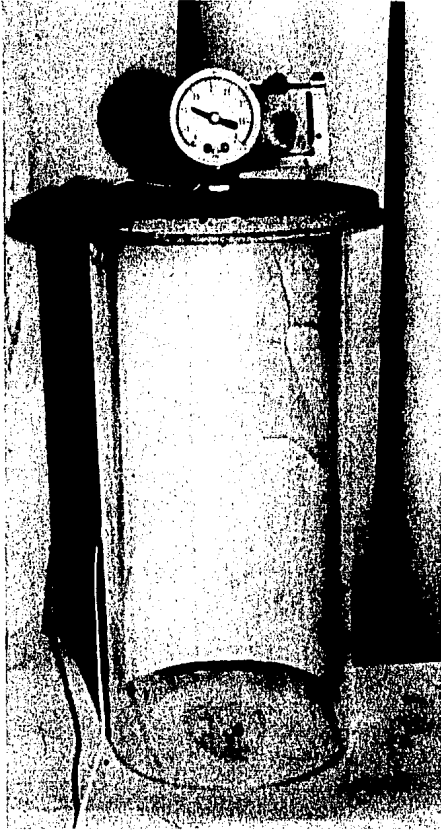
#### Pruebas de respuesta a un impulso

Se hicieron algunas pruebas adicionales a las anteriores estudiadas. De alguna de ellas se pretendió obtener la respuesta del transductor de presión a un impulso de presión que se ensayó con señales súbitas ocasionadas por la explosión de un globo inflado o de un cohete. El registro de la señal se llevó a cabo con la misma instrumentación que se utilizó en las pruebas de respuesta libre.

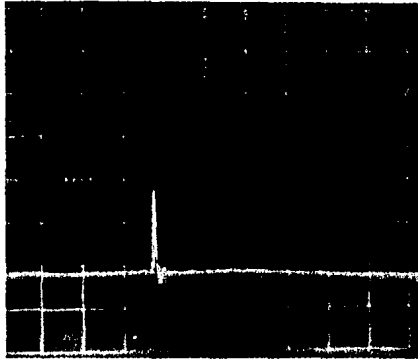
Explosión de un globo. Se utilizó una cámara cilíndrica de vinilo (diámetro: 15cm; altura: 30cm); uno de sus extremos era separable lo cual permitía inflar el globo en el interior de la cámara hasta que el aumento de volumen fuera detenido por las paredes de vinilo, luego se ligaba el globo, se cerraba la cámara y finalmente se hacía estallar el globo al pincharlo con un punzón delgado accionado manualmente desde el exterior de la cámara. La onda de choque iniciada al reventar el globo era registrada por el transductor de presión conectado en uno de los extremos del cilindro plástico. Dicha onda es una excitación que intenta semejar la señal impulso estrictamente definida (véase sección 6.2 (2)). Y aquí aparece un punto interesante para discusión, cómo conocer con exactitud la señal de entrada que pretendemos considerar como un impulso. Por otro lado -anticipando-, ciertamente se ha definido este tipo de señal para un muy pequeño intervalo de tiempo y un gran valor en la intensidad o amplitud, pero para sistemas mecánicos es en la mayoría de los casos difícil de lograrla, siendo más identificable en los circuitos eléctricos.

En la Fig. 6.9 (a) aparece una fotografía de la señal registrada en el osciloscopio al estallido de un globo. Analizando la fotografía, se obtiene el intervalo de tiempo y la intensidad de la respuesta, 0.10 segundos y 14 milivoltios respectivamente; y el tiempo para que la señal decaiga del punto máximo al inicial -nuevamente- es de 0.5 segundos en aproximación.

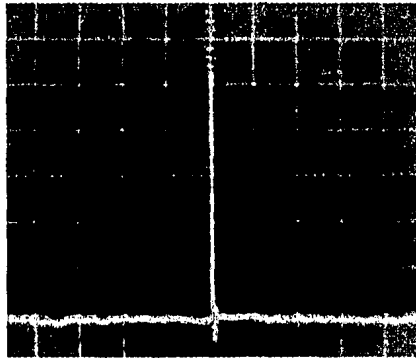
Ahora bien, recurriendo a las fotografías obtenidas en la respuesta libre (p.ej. Fig. 6.7), encontramos que el tiempo requerido para que la señal de voltaje inicial



Transductor instalado en la cámara para pruebas de explosión.



a) Explosión de un globo  
(0.5 seg/div ; 2 mv/div)



b) Explosión de un cohete

Fig. 6.9 Respuesta a un impulso  
(0.5 seg/div ; 5 mv/div)

pase por el valor que será final después de ser amortiguada la misma, es de 0.05 segundos. Luego, el valor de voltaje que representa la amplitud lograda en ese tiempo (es decir el valor de la condición inicial) es de 0.2 voltios.

Los valores de tiempos calculados son similares (0.5 segundos) no así los valores de voltaje (4mv y 180 mv); esto nos lleva a una conclusión: puesto que el dispositivo transductor respondió con un tiempo igual al de respuesta libre pero con diferentes intervalos de voltajes, se nota que para las señales con un mismo valor de voltaje, el transductor respondería a una igual supuesta señal impulso utilizando mayor tiempo que el necesario para la respuesta libre.

Si el transductor fuera sometido a una verdadera señal impulso, éste respondería con la misma rapidez que lo haría en respuesta libre. Digamos, -para dejar bien claro- en diagrama deberíamos tener:

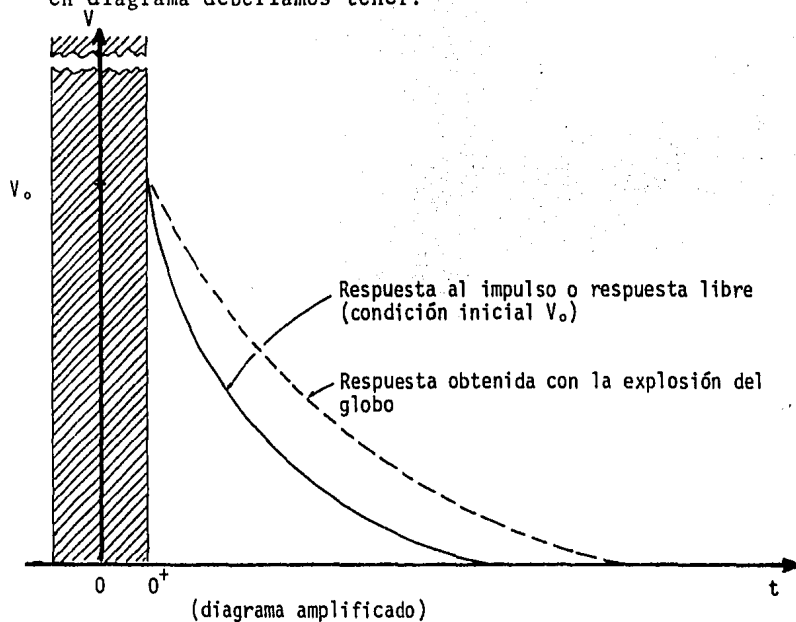


Fig. 6.10 Análisis de la respuesta al impulso supuesto

He aquí que hemos demostrado que con la explosión de un globo no logramos una onda de choque que pueda igualar un impulso de presión, sin embargo es una aproximación que nos deja ver la manera en que se comprueba el comportamiento dinámico del transductor. Nótese en las Figs. 6.7 y 6.9a cómo, antes de que su movimiento llegue al estado final recorre por una pequeña sinusoidal amortiguada. Aclaremos más todo lo anterior con los resultados obtenidos de la segunda serie de pruebas.

Explosión de un cohete. En este caso la onda de presión ocasionada por el estallido del cohete es de mayor amplitud que la del globo y ofrece ser una señal más cercana a un impulso. En la Fig. 6.9b se muestra una fotografía de la respuesta obtenida por el transductor con la explosión. De ahí se obtiene una intensidad de 40mv, -mayor cuatro veces que la del globo- con un tiempo igual al experimento anterior (0.10 seg. intervalo de tiempo en que sucede la respuesta y de 0.5 seg., el tiempo necesario para que ocurra el retroceso de la señal, es decir, siguiendo la trayectoria a partir del pico y descendiendo hasta el valor inicial). El diagrama correspondiente a esta respuesta sería muy similar a la del globo; en la Fig. 6.10 la línea de retroceso estaría entre la punteada y la continua. Tampoco la explosión de un cohete es la del impulso de presión estrictamente definido, sin embargo es interesante observar como se comporta la dinámica del transductor en su retorno. Al igual que en la respuesta al estallido del globo, aparece una pequeña señal sinusoidal amortiguada, pero en el caso del cohete esa señal es de mayor amplitud debido a la intensidad de onda de presión; se nota más claramente que la oscilación que decae podría



ser de mayor duración si se aplicara mayor presión. Nuevamente se comprueba la conducta del transductor mostrada en la experimentación de la respuesta libre.

En conclusión a estos párrafos en que se ha discutido la respuesta impulso y la respuesta libre, sobresale una observación, el sistema de transducción creado, dinámicamente es un sistema fuertemente amortiguado y con un tiempo de respuesta pequeño, basta observar las últimas figuras y verificar lo rápidamente que son absorbidas las oscilaciones.

#### Pruebas de respuesta a una señal sinusoidal

Este tipo de respuesta conocida también como respuesta a la frecuencia, se obtuvo por medio de una señal excitadora -aproximada a una sinusoidal-, conseguida con movimiento cíclico del pistón de un compresor.

La singularidad en esta prueba fue utilizar, un transductor de manufactura comercial (KYOWA PE-5KRMT) con el objeto de comparar su registro con el que se obtuviera del transductor aquí discutido. Dicho transductor basa también su sensor en un sistema de indicadores de deforma

ción (ID).

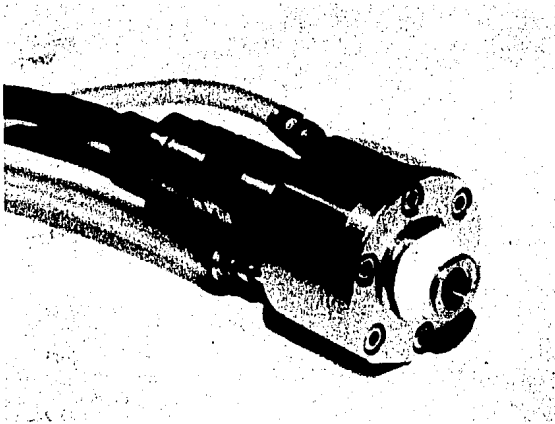
La instrumentación que se llevó a cabo fue similar a las dos anteriores, sólo que aquí, se tuvo que sumar una amplificación más -ahora de 100- a la señal (lo que resulta en una ganancia total de 1000) puesto que el voltaje de salida del puente formado por ID's en el transductor comercial, aparece en unidades de Microvolts, y se pretendría que ambas instrumentaciones -la del transductor comercial y la del construido- fueran las mismas, para evaluar comparativamente las señales de salida de ambos transductores.

El compresor que se utilizó fue uno de doble efecto (Worthington 7 kg/cm<sup>2</sup>); éste posee una conexión de tubería que tiene como fin el uso de un diagramador de presión, y la cual fue adaptada para colocar los transductores. El registro de las señales periódicas de presión ocasionadas en el interior del cilindro del compresor se pueden apreciar en las Fig. 6.11 y 6.12. Las dos primeras fotografías, tomadas del osciloscopio, muestran señales cercanas a una sinusoidal y estas fueron sensadas por el transductor de presión construido y analizado en este trabajo. Luego, la tercera fotografía presenta la señal registrada por el transductor de presión de manufactura comercial, que como se puede contemplar es muy similar. La senoide es curvada en su parte superior, y más abierta en la parte inferior, ello se puede constatar con mayor precisión en la fotografía de la Fig. 6.11.b., cuya amplitud está amplificada.

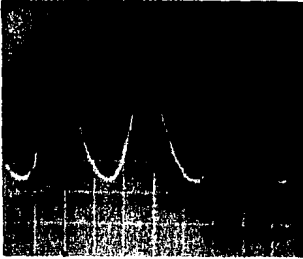
Siendo un tanto severos en la observación de las señales fotografiadas, se puede verificar que la del trans-



Compresor utilizado en las pruebas de respuesta a sinusoidales (al fondo derecho, el transductor instalado)



Transductor de presión comercial (Kyowa PESKRMT)



a) (2 volts/div; 50 m seg/div)

b) (2 volts/div, 0.1 seg/div)

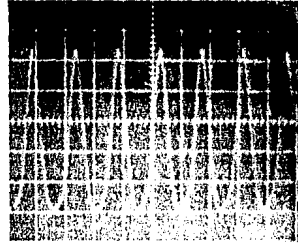
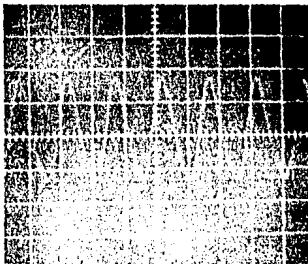


Fig. 6.11 (Fotografía) Respuesta del transductor al comportamiento de la presión dentro del cilindro del compresor.



(0.5 volts/div;  
0.1 seg/div)

Fig. 6.12 (Fotografía) Respuesta del transductor comercial al comportamiento de la presión dentro del cilindro del compresor.

ductor comercial es una línea cuya trayectoria quiebra en varios puntos, lo cual se debe a que existe una componente de una señal interferente que no pudo eliminarse con el equipo electrónico utilizado. Sin embargo, la señal de la Fig. 6.11.b., gravada con el mismo barrido de tiempo, a pesar de estar amplificada no muestra tal interferencia.

Lo anterior se debe lógicamente a que el voltaje de salida del puente de ID del transductor comercial es de un valor muy pequeño y requiere de instrumentación un tanto específica, lo que no sucede con el valor de voltaje del puente de ID's aplicado en nuestro transductor. Aquí aparece una ventaja para nuestro medidor, ya que su instrumentación se puede efectuar con dispositivos electrónicos más comunes que los necesarios en otros transductores (por ejemplo en los de marca comercial KYOWA).

## CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se intentó dar una clara explicación del diseño, la construcción y características estáticas y dinámicas de un transductor de presión, que basa su funcionamiento en el uso de indicadores de deformación (ID) sobre una adaptación en un manómetro de tubo de Bourdon faldado.

Los resultados específicos que de este diseño se han presentado en distintos capítulos, nos muestran que el transductor de presión manufacturado es un sistema rígido, es decir, fuertemente amortiguado y con un tiempo de respuesta dinámica lo suficientemente pequeño, para registrar con él transitorios de presión que son objeto de estudio en ciertos fenómenos (flujo bifásico p.éj.). Su funcionamiento fue comparado con el de un transductor de presión de manufactura comercial a través de una prueba de respuesta a señales sinusoidales; se verificó un comportamiento ejemplar que en algunos puntos aventaja al del dispositivo comercial.

Destaca también su bajo costo incluyendo que su manufactura (sin considerar a los indicadores de deformación) es posible realizarla en nuestro país.

Respecto a los objetivos propuestos al iniciar este proyecto, podemos mencionar que el dispositivo transductor concebido cumple perfectamente con ellos. Sin embargo, es justo reconocer que se identificaron ciertas fallas en el instrumento, que deben ser corregidas para el óptimo funcionamiento del mismo. Por ejemplo, el apoyo que tiene el extremo de la

laina de acero (laminilla instrumentada) sobre el tubo de Bourdon -a través de una esferilla metálica- no es fijo, lo que induce a pensar en que el retroceso de una señal registrada puede no ser el verdadero, es decir que cuando el tubo de Bourdon retorne lo haga separado de la laina de acero. Otro punto es la colocación de los cables soldados a los ID; la extensión de estos cables tiene un peso que provoca deformación en la laina, por lo cual es necesario sujetarlos y mantenerlos siempre en una sola posición.

Un aspecto más que se debe corregir en el diseño del transductor, es la base en que apoya la laina de acero. Después de haber realizado algunas pruebas con vapor de agua (a 170°C) se notó que la temperatura en la superficie donde la base une con la laina, es mayor que en otros puntos de la base, lo cual no es adecuado para los ID's que tienen un límite de temperatura. Se debe buscar un diseño en la base que disminuya la transferencia de calor y se logren gradientes de temperatura mayores. Por otra parte es posible adaptar un sistema de enfriamiento sobre el transductor que permita sea utilizado para fluidos con medianas temperaturas.

Otro inciso a considerar es el peligro de recibir una señal de presión grande o un impacto que produjera la deformación de la laina hasta su límite plástico. Esto podría evitarse con una obstrucción que limitara el movimiento de la laina.

Concluyendo, en el contenido de los capítulos de alguna forma se han hecho comentarios, discutido resultados,

expuesto ideas; únicamente resta indicar -otra vez- que el dispositivo obtenido no sólo cumplió con los objetivos perseguidos, también ofrece una gran posibilidad de ser utilizado en las industrias de proceso y de energía con la alternativa de ser sujeto a un sistema de control, y todo esto a un bajo costo.



## BIBLIOGRAFIA

- Carr, Joseph J.  
Elements of Electronic Instrumentation & Measurement  
Reston Publishing Co., Inc. a Prentice Hall Company; 1979
- C.E.A. E.D.F.  
Techniques de mesure dans les ecoulement  
Collec. de la direction des études et recherches d'électricité  
de France. Paris Eyrolles, 1974
- Cooper, William David  
Electronic Instrumentation and Measurement Techniques  
Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.  
2nd. edition, 1978
- Benedict Robert P.  
Fundamental of Temperature, Pressure and flow measurements  
John Wiley and Sons, Inc, 1977
- Holmar, Jack P  
Experimental Methods for Engineers  
Mc Graw-Hill Book Co., INC., U.S.A. 1971
- Haward P; Kallen (editor)  
Handbook of Instrumentation and Controls  
Mc Graw-Hill Book, Co, INC, U.S.A. 1961
- Imstandt, MA; Enke; Crouch  
Instrumentation for Scientists Series  
Menlo Park, Calif. Benjamin, 1973
- Lyons, Jerry L.  
The Designers Handbook of Pressure Sensing Devices  
Ed. Van Nostran Reinhold Company, 1980
- O'Higgins  
Basic Instrumentation  
(Industrial Measurement) Mc Graw-Hill N.Y. USA, 1966
- Wedlock B.D. and Roberge J.K.  
Componentes Electrónicos y Mediciones  
Editorial Prentice Hall International, 1973

Woolvet, G.A.  
Transducers in digital systems; Peter Peregrinus LTD  
IEE Control Engineering Series 3; England 1977

Cervantes de Gortari, Jaime y Sen. Mihir  
Métodos Experimentales en Termofluidos  
Apuntes de la División de Educación Continua, F.I.  
UNAM, 1984

Muñoz Gamboa Caupolicán (y otros)  
Instrumentación Electrónica  
Apuntes de la División de Educación Continua, F.I.  
UNAM, 1983

Montiel Mayorga, Anastasio (y otros)  
Dispositivos y Circuitos Electrónicos  
Apuntes de la División de Educación Continua, F.I.  
UNAM, 1984

Cannon, Robert H. Jr.  
Dynamic of Physical Systems  
Mc Graw Hill Book Company, 1967

Doebelin, Ernesto O.  
Measurement Systems: Application and Design  
Mc Graw Hill Book Company, 1975

Gerez Greiser, Víctor y Murray Lasso, M.A.  
Teoría de Sistemas y Circuitos, Vol. I  
Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.  
México, 1972.

Ross, Shepley L.  
Differential Equations  
John Wile yand Sons, U.S.A. 1974

Dally, James W. and Riley Williams F.  
Experimental Stress Analysis  
Mc Graw Hill Book Company, 1978

Popov, Egar P.  
Introducción a la mecánica de sólidos  
Editorial Limusa, México, 1980.

Timoshenko, S.P. and Gere J.M.  
Mecánica de Materiales  
México, UTEHA 1974

Cagle, R.  
Handbook of Adhesive Bonding  
Mc Graw Hill, 1971

Lee and Neville  
Handbook of Epoxi Resing  
Mc Graw Hill, 1983

## APENDICE A

### ANALISIS EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS

Para un sistema sobre el cual los desplazamientos y de formaciones son pequeños, derivados de la teoría de elasticidad, tenemos los seis componentes cartesianos de deformación en términos del campo de desplazamiento.

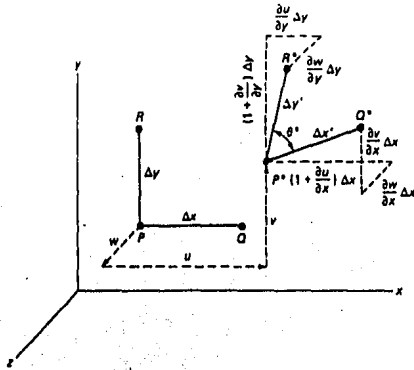


Fig. A.1 Gradientes de desplazamiento asociados al esfuerzo cortante  $\gamma_{xy}$

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

$\epsilon$  son deformaciones normales y  $\gamma$  son deformaciones cortantes.

La mayor parte de las aplicaciones de ID se encuentra en superficies libres de un cuerpo.

Un estado bidimensional de esfuerzos que aparece en una superficie puede expresarse en términos de las deformaciones cartesianas  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$  y  $\gamma_{xy}$ . Así, si los desplazamientos "u" y "v" son conocidos las deformaciones pueden ser determinadas directamente por la ec. (A.1). En ciertos casos, la aproximación más apropiada para la determinación de esfuerzos y deformaciones es la determinación de desplazamientos. Sin embargo, puesto que esto a menudo es difícil de obtener, es aconsejable emplear un ID de una y otra forma para medir las deformaciones de la superficie directamente.

Ahora bien, al utilizar un ID se debe tomar la siguiente consideración:  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$  y  $\gamma_{xy}$  son las derivadas de los desplazamientos u y v, estas deformaciones no son constantes por lo general, puesto que varían punto a punto.

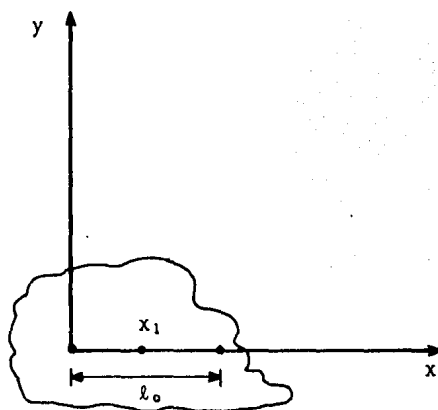
Auxiliados por la Fig. A.2 y definiendo,

$$\Delta u = l_x - l_0$$

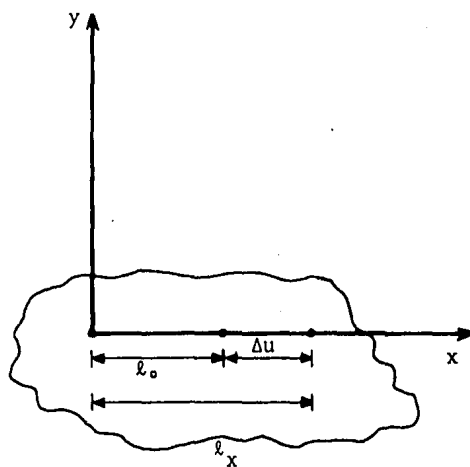
$$\Delta x = l_0$$

suponiendo que  $l_0$  es la longitud del ID.

Si se quiere obtener la deformación en el punto medio de la línea  $l_0$ , o sea en  $x_1$ , el error involucrado para diferentes gradientes de esfuerzo es:



a) Antes de la deformación



b) Después de la deformación

Fig. A2 Medición de la deformación en un corto segmento de línea de longitud  $l_0$ .

- 1) la deformación es constante  $\epsilon_{xx} = k_1$ , no aparece error
- 2) la deformación es lineal  $\epsilon_{xx} = k_1x + k_2$ , no aparece error
- 3) la deformación es cuadrática  $\epsilon_{xx} = k_1x^2 + k_2x + k_3$ ,

en este último, un error aparece puesto que la deformación en el punto medio  $x_1$  no es igual al promedio de deformación en la longitud  $l_0$ .

El promedio de deformación a través de  $l_0$  se calcula

$$\epsilon_{AV} = \frac{\int_0^{l_0} (k_1x^2 + k_2x + k_3) dx}{l_0} = \frac{k_1 l_0^2}{3} + \frac{k_2 l_0}{2} + k_3 \quad (A.2)$$

y el evaluado en el punto  $x_1 = l_0/2$

$$\epsilon_{xx} \Big|_{l_0} = \frac{k_1 l_0^2}{4} + \frac{k_2 l_0}{2} + k_3 \quad (A.3)$$

la diferencia entre la ec. (A.2) y (A.3) representa el error involucrado y es

$$\text{Error} = \frac{k_1 l_0^2}{12}$$

como se puede observar en la ec. anterior el error depende de los valores de  $k_1$  y  $l_0$ .

Debido al error introducido por la longitud del segmento de línea en ciertos campos de deformación, grandes esfuerzos se han realizado para reducir el tamaño del indicador (o gage)  $l_0$ .

Los factores que complican estos esfuerzos son:

- 1) dificultades mecánicas cuando  $l_0$  es reducido; se debe tener cierto tamaño finito y un cierto número de partes. Si el tamaño es muy reducido, las partes serán más pequeñas y las tolerancias dimensionales imposibles de obtener.
- 2) la deformación que se pretende medir es una cantidad muy pequeña.

El tamaño y la precisión requeridas para obtener ID miniatura son dos dificultades que los especialistas actualmente intentan resolver.

Los indicadores (o gages) más pequeños desarrollados y vendidos comercialmente hasta la fecha son los que podríamos llamar de resistencia. Las deformaciones no pueden medirse en un punto con ningún tipo de indicador, y como consecuencia ningún campo de esfuerzo no-lineal es posible medir sin error. El error dependerá del tamaño longitudinal del indicador ( $l_0$ ).



## APENDICE B

### TIPOS DE STRAIN GAGES (ID)

El desarrollo histórico llevado a cabo por los indicadores de deformación ha seguido diferentes caminos. Los indicadores (o gages) han sido desarrollados con base a principios mecánicos, ópticos, eléctricos, acústicos y neumáticos y con ellos se han logrado los actuales sistemas de indicación de deformación. Sin embargo, en todos estos sistemas de indicación obtenidos se encuentran cuatro características básicas que los agrupa y que son imprescindibles considerar:

- a) longitud del indicador (o gage) - $l_0$ -
- b) la sensibilidad del indicador
- c) el rango de deformación
- d) la exactitud o precisión de la lectura.

Al elegir un ID, son estos cuatro puntos los más importantes en que debemos pensar.

Los principios utilizados en los diferentes ID (strain gages) nos permiten clasificarlos en los siguientes grupos (Fig. B.1):

1. Mecánico
2. Óptico
3. Acústico
4. Eléctrico

ID mecánico. Como ejemplo en este tipo de ID tenemos el tensómetro de Huggenberg, un dispositivo mecánico bas

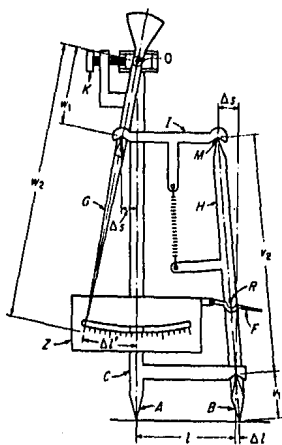


Fig. B.1.a. Tensómetro Huggenberg  
(ID mecánico)

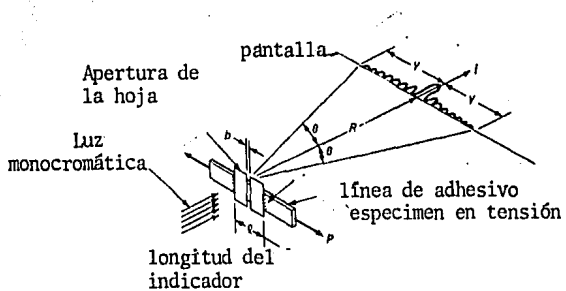


Fig. B.1.b ID tipo difracción (ID óptico)

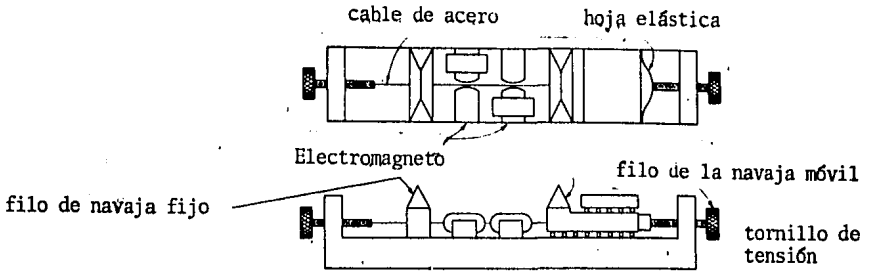


Fig. B.1.c. Dibujo esquemático del ID acústico Jerrett

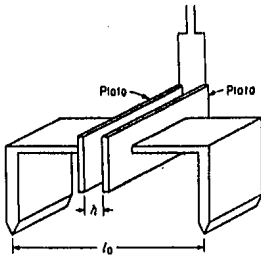
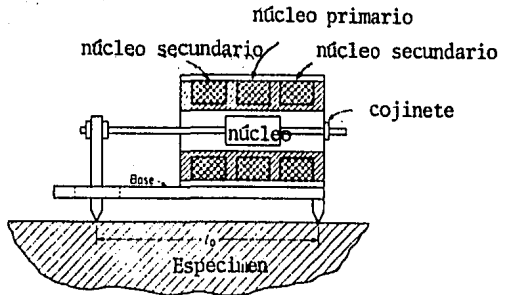


Fig. B.1.d. Esquema de un ID de capacitor

Fig. B.1.e Esquema de una transformador lineal diferencial empleado para un transductor de deformación.



tante preciso. Estos indicadores, sin embargo, tienen una capacidad limitada para la medición de deformaciones dinámicas. Debido al tamaño y peso de los componentes mecánicos, la respuesta a la frecuencia es limitada, y son más situables en aplicaciones que involucren mediciones de deformación quasi-estáticas.

ID ópticos. Se hallan dos tipos, indicadores de deformación por difracción y por interferometría. La disponibilidad de láseres de gas y rubí como fuentes de luz monocromática, colimada y coherente han conducido a nuevos desarrollos en estos ID. Los que aprovechan el fenómeno de difracción son muy simples de instalar y usar, tienen muchas ventajas en la medición de altas temperaturas puesto que es automáticamente compensada la temperatura si las hojas son construidas del mismo material que el espécimen. El ID por interferometría ofrece un método de medición de deformación que no requiere indicador en sí, eliminándose efectos de reforzado o dificultades de unión. Además puesto que no hay contacto, el método puede emplearse sobre partes rotatorias o en ambientes hostiles; la compensación de temperatura es automática y pueden ser empleados a muy altas temperaturas.

ID acústicos. Utilizados desde finales de los 20's, en general han sido desplazados por los ID de resistencia eléctrica. Sin embargo, su estabilidad a largo término y su libertad de inacción en períodos largos de tiempo, los hacen únicos. Ejemplo de ello es el indicador acústico de Jerret\*. La sensibilidad de este dispositivo es muy alta, aunque su rango de funcionamiento es limitado.

\* R.S. Jerret desarrolló en 1944 este s.g.

ID eléctricos. Estos indicadores son actualmente los más desarrollados y entre ellos los de mayor importancia son de tipo resistivo. Desde hace más de 30 años los ID eléctricos han tenido amplia aceptación y ahora dominan el mercado de los indicadores de deformación. Además de los indicadores de deformación de resistencia, están los capacitivos y los inductivos.

- a) ID capacitivo. Estos utilizan la capacitancia de un capacitor de platos paralelos, la cual se define así:

$$C = C_0 \frac{kA}{h}$$

k = constante dieléctrica

A = área de la sección cruzada de los platos

h = distancia entre platos

al permitir variar cualquiera de estos parámetros se obtiene una relación con el valor de la capacitancia, p. ej., al variar la distancia entre platos, al mover uno de los platos en dirección transversal respecto al otro -se modifica el área entre platos- o introduciendo un cuerpo con una constante dieléctrica mayor que la del aire, entre los dos platos.

- b) ID inductivo: De los diferentes ID de este tipo el más representativo es el que utiliza un transformador diferencial lineal (LVDT), y consiste en un núcleo que se desplaza debido a algún efecto que se quiere medir (p.ej. una presión de fluido). Al cambiar de posición el núcleo respecto al embobinado, una señal eléctrica aparecerá, proporcional al efec

to mecánico provocado en el núcleo.

En las siguientes páginas se expone con precisión las características de los ID resistivos o de resistencia.

APENDICE B  
(Continuación)

CLASIFICACION DE ID DE RESISTENCIA ELECTRICA

Por la forma en que son manufacturados, estos indicadores pueden ser unidos (bonded) o no-unidos (unbonded); el concepto de unión se refiere cuando el ID (strain gages) va adherido o pegado -por lo general con cementos especiales- al espécimen o al material sobre el que se quiere conocer la deformación (en nuestro caso a la laina de acero inoxidable). Teóricamente es posible medir una deformación con un trozo sencillo de alambre como elemento sensor del ID, sin embargo, los requisitos del circuito exigen prever sobrecarga de la fuente de poder y minimizar el calor generado por la corriente, para lo cual se necesita un indicador de, por lo menos,  $100\Omega$  de resistencia. Si queremos obtener tal resistencia en un delgado alambre con resistividad común, precisaríamos tener una longitud de por lo menos 10cm en este alambre; así pues, si no tenemos posibilidad de extendernos longitudinalmente sobre el espécimen o sencillamente queremos medir la deformación en un punto, un alambre con longitud de 10cm no servirá como sensor del ID si es colocado longitudinalmente. Para solucionar el anterior problema, el alambre sensor puede colocarse en forma de zig-zag; los ID unidos tienen esta característica.

Los indicadores no-unidos que fueron los primeros ID del tipo resistivo, consisten (véase Fig. B.2) en un trozo de alambre tensado por dos soportes flexibles, estos soportes van unidos a un diafragma metálico delgado que se monta al material-espécimen; cuando aparece una fuerza que flexiona

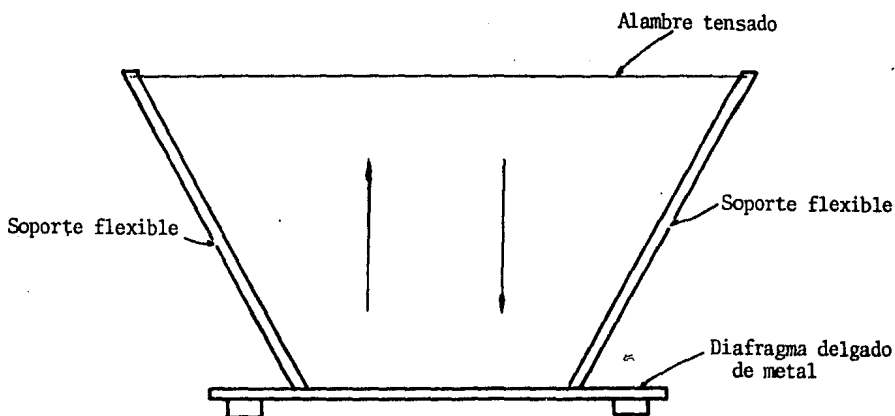


Fig. B.2 Diagrama de Id no-unido

na el diafragma, los soportes se flexionan también tensando o comprimiendo el alambre, lo cual dependerá del sentido de la fuerza.

Los ID unidos se desarrollaron a mediados de los 30's a través de Ruge y Simmons, quienes independientemente utilizaron un alambre con la longitud requerida en un modelo de red, como el mostrado en el diagrama (Fig. B.3).

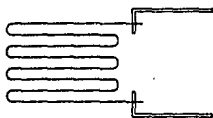


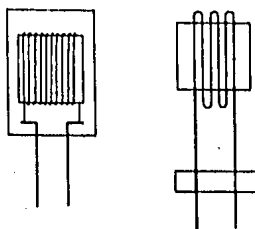
Fig. B.3. Diagrama de indicador de deformación unido (de alambre)



El problema de sujeción del ID unido fue resuelto al pegar con adhesivo adecuado la red de alambre al espécimen. Estos indicadores de alambre en red (metal-wire strain gages) son utilizados en casos especiales; casi únicamente se utilizaron entre 1935 y 1955 como medidores de deformación.

Los ID de alambre-metal unidos (metal-wire strain gages), entonces, consisten en una red plana de alambre muy delgado (filamento) que siguiendo un camino en zig-zag obtiene su configuración. Los conductores de alambre se sueldan a las terminales del filamento para facilitar las conexiones eléctricas externas. Lograda la red alámbrica, ésta se pega a una base portadora (p.ej. papel nitrocelulosa) que a su vez se coloca y une a la superficie sobre la cual se quiere conocer la deformación. Cuando se tiene una temperatura hasta de  $470^{\circ}\text{C}$ , el filamento es embebido a portadores-base de bakelita. Las aleaciones de cobre-níquel como el constantán son las más frecuentemente utilizadas como material del filamento. Los diámetros del alambre se encuentran en general entre 0.02 y 0.04mm. Los coeficientes de temperatura de la resistencia varían entre  $-50 \times 10^{-6}$  y  $+50 \times 10^{-6}$  por grado Celsius y alrededor de 0 a  $10^{\circ}\text{C}$ . El factor de indicación (factor gage) de indicadores comerciales de alambre cobre-níquel pueden ser menores a 1.7, pero normalmente se hallan en un rango de 1.9 a 2.1.

Otros materiales para el alambre (filamento) incluyen aleaciones níquel-cromo y platino-iridio para aplicaciones de alta temperatura, así como aleaciones hierro-cromo-aluminio e hierro-níquel-cromo para cuando se requieren factores de indicación mayores (2.8 a 3.5) y la temperatura de operación es moderada.



(a) amarre alrededor

(b) con superficie transferible

Fig. B.4 ID unidos (amarres especiales)

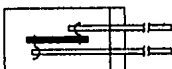
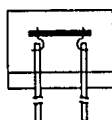
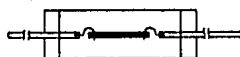


Fig. B.5. Elementos semiconductores con diferentes tipos de alambre-conductor

Se tienen también ID de alambre soldables, los cuales fueron originalmente desarrollados para la medición en altas temperaturas, se han utilizado con éxito en aplicaciones difíciles, por ejemplo en tanques que contienen líquidos criógenos. Para su unión requieren de microsoldado.

Actualmente se cuenta con ID que consisten para su manufactura de técnicas sofisticadas: los ID de hojuela-metal, de metal depositado y de material semiconductor. El primero es visto en el capítulo 4 con más detalle pues es el que fue utilizado en la adaptación al manómetro de tubo de Bourdon.

En lo que respecta a los dos restantes mencionaremos aspectos generales.

Los ID de metal depositado (deposited-metal strain gages) utilizan técnicas de película-delgada y se aplican directamente al material en estudio. La superficie a medir es recubierta con un sustrato aislante sobre el cual puede entonces formarse el indicador (o gage) por métodos evaporativos o de bombardeo. La aplicación de este tipo de indicador se ha limitado a diafragmas de transductores de presión. Se utiliza también una técnica llamada flama-atomizada (flame-sprayed), ella consiste en unir una red metálica (sensitiva a la deformación) a un sustrato cerámico aislante por medio del lanzamiento de partículas de polvo cerámico sobre la superficie en medición. Este tipo de ID se aplica en estructuras expuestas a ambientes hostiles, por ejemplo en la superficie exterior de cohetes.

Los ID de semiconductores (semiconductor strain gages) aparecieron en consecuencia a los experimentos realizados

a inicios de los 50's y que confirmaron que el efecto piezo resistivo es mayor en semiconductores que en los conductores. Las características de sensibilidad son excelentes, estos ID llegan a tener factores de indicación (gage factors) entre 50 y 200, comparados con los indicadores de deformación de metal que tienen sensibilidades no mayores de 6, y con frecuencia alrededor de 2. Sin embargo, estos indicadores semiconductores no ofrecen buena disponibilidad para utilizarse en superficies a medir, sus rangos de deformación son usualmente limitados  $\pm 3000\mu\epsilon$ ; igual sucede con los rangos de temperatura que aún son más limitados, además la compensación de temperatura dentro de su rango es muy laboriosa. El coeficiente de temperatura en la ecuación de resistencia de los semiconductores es de 60 a 100 veces más grande que el constantán, la variación de sensibilidad respecto a la temperatura es de 3 a 5 veces más grande y el coeficiente Seebeck (potencial termoeléctrico) generado en conexiones puede ser de 10 a 20 veces mayor. La expansión térmica diferencial entre el semiconductor y la superficie a medir metálica (espécimen-metálico) puede también ser más grande. El coeficiente de expansión lineal del ID semiconductor es típicamente una y media veces mayor que el de ID de metal.

La resistividad de un semiconductor es inversamente proporcional al producto de la carga electrónica, al número de cargas, y su promedio de movilidad. El efecto de un esfuerzo aplicado es cambiar tanto el número de cargas y su promedio de movilidad. Así que el factor de indicación (gage factor) depende del cambio de resistencia debido al cambio dimensional  $(1+2\nu)$  -véase ecuación B.3- y al cambio de resistividad. Esto de alguna forma ocasiona una no-linealidad en el fenómeno. La no-linealidad y la compensación de

temperatura se solucionan con métodos apropiados pero que implican se vuelva un tanto imprácticos la instalación y uso de estos ID.

Los ID metal-hojuela tienen grandes ventajas sobre los mencionados; este tipo de indicador muestra características favorables, por ello fue utilizado en la instrumentación del manómetro de tubo de Bourdon. En el capítulo 4 se muestran las particulares de estos, y más adelante se presenta una clasificación de los mismos.

APENDICE B  
(Continuación)

CLASIFICACION DE LOS ID DE HOJUELA METALICA

En la Fig. B.7 se muestran ID de hojuela-metálica típicos. La mayoría de ellos están provistos de porciones relativamente grandes de hojuelas integrales para que los conductores sean sujetos con mayor facilidad. A esas regiones les podemos nombrar terminales del indicador (tabs).

La configuración más común es la presentada en la Fig. B.7 (a) como puede verse el modelo es más alargado en el eje sobre el cual se va a sensar la deformación, así se minimizan los efectos de la deformación transversal. El solado de los conductores externos se facilita por lo ancho de las terminales. Si las deformaciones son conocidas y se encuentra que son uniaxiales, por ejemplo cuando las deformaciones transversales son despreciables en la medición de la superficie, es muy recomendable un ID de diseño amplio, es decir con una hojuela ancha (Fig. B.7 b). La hojuela ancha, además, puede disipar más potencia debido a su tamaño permitiendo así voltajes de excitación más grandes y salidas en el puente mayores.

En nuestro caso, hubiese sido muy beneficioso utilizar este último tipo de configuración de hojuela, sin embargo, como se vió en el Capítulo 4 el uso de la hojuela normal permitió pegar sobre la lana de acero cuatro indicadores y así formar un puente con cuatro brazos activos, o sea, con cuatro resistencias variables a la deformación.

La roseta de tres elementos con 45 o 60 grados entre ellos (Fig. B.7 C) puede ser utilizada en superficies en las que deseamos conocer el valor y la dirección del esfuerzo o la deformación principal.

Como se mencionó algunos párrafos atrás, gracias a la gran versatilidad de las técnicas de fotograbado de hojuelas se pueden manufacturar un número de configuraciones especiales que satisfacen diferentes necesidades. Ejemplo de ellas se presentan en las Figs. B.7 a B.12. Las Fig. B.8 y B.11 muestran arreglos de dos y tres elementos adicionales a la Fig. B.7. Los indicadores biaxiales consisten en dos redes idénticas colocadas a  $90^\circ$  una de otra. Se utilizan para mediciones en las cuales la dirección de las deformaciones principales ortogonales es conocida. Las redes pueden situarse sobre un eje de referencia o a  $45^\circ$  de él según el problema que se tenga, por ejemplo una roseta biaxial ( $45^\circ+45^\circ$ ) es muy útil para determinación de deformación torsional en mediciones de toque.

La roseta triaxial con los elementos I y II espaciados  $60^\circ$  del eje sensor del elemento III, es destinada a aplicaciones en donde la dirección de las deformaciones principales en la superficie en medición debe ser determinada; la longitud de cada uno de los tres elementos es 2mm. Cuando se empleen indicadores de roseta, es necesario operar sobre las lecturas de salida usando la relación de Poisson para convertir el promedio de deformación a esfuerzo o tensión.

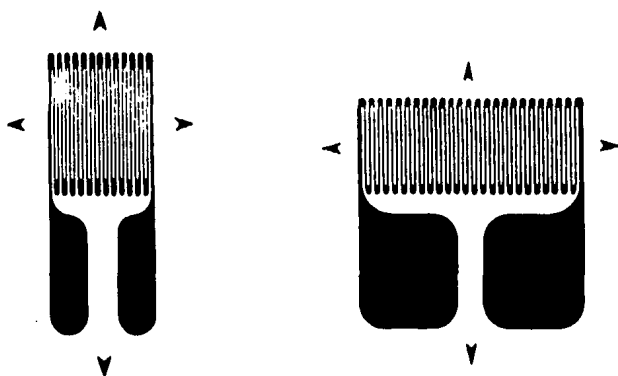
El indicador con hojuela espiral (Fig.B.9) es muy útil en mediciones de deformación tangencial en un diafragma; el modelo es bifilar, así, se eliminan efectos inductivos, además de facilitar su construcción; configuración si-

milar muy especial y bastante útil -aplicable a transductores de presión- se muestran en la Fig. B.11. Con mayor frecuencia se utilizan las rosetas de puente completo aplicables al área estructural (Fig. B.10 a) y a vigas en flexión (Fig. B.10-b).

Por último, el indicador de deformación-esfuerzo se compone de dos elementos sensores de deformación uniaxiales orientados  $90^\circ$  uno del otro, y con el se obtienen valores de esfuerzo en diferentes materiales (Fig. B.12).

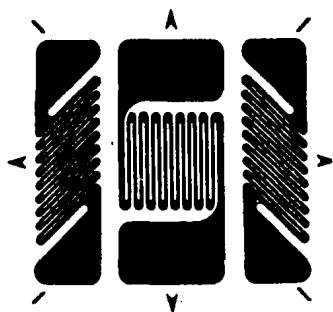
Existen también ID de dos y tres elementos, que a diferencia de los mencionados, éstos están encimados; lo que permite un ahorro de espacio.





a) Red con anchura normal

b) red amplia



c) roseta de tres elementos en configuración rectangular "V"

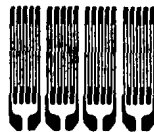
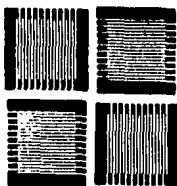
Fig. B.7 Indicadores de deformación de hojuela metálica

a) roseta bioaxial ( $90^\circ$ )b) roseta bioaxial ( $45+45$ )c) roseta triaxial ( $60^\circ$ )

Fig. B. 8 Rosetas de ID de hojuela metálica



Fig. B. 9 ID de hojuela-metálica en espiral



a) roseta de puente completo

b) rosetas para viga en flexión

Fig. B. 10 Rosetas de ID hojuela-metálica con cuatro elementos.

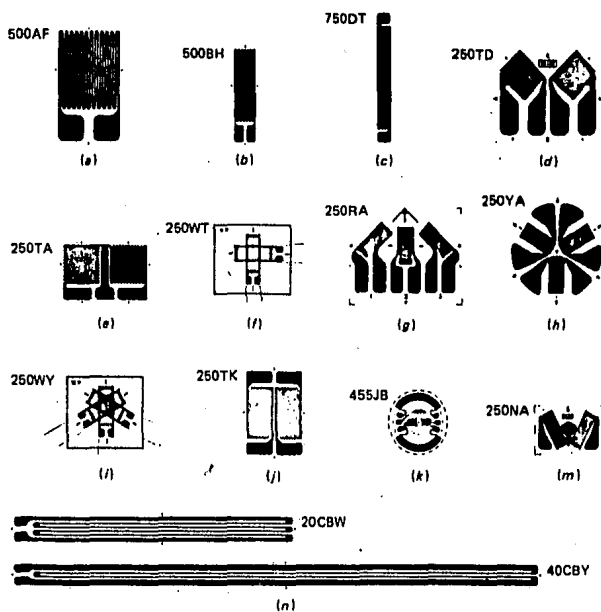


Fig. B.11 Variedad de ID (Micrometers)

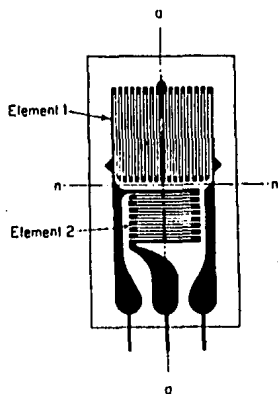


Fig. B.12 Indicadores de deformación-esfuerzo de hojuela-metálica.

## APENDICE C

### COLOCACION DE LOS INDICADORES DE DEFORMACION

El método más común para colocar los ID unidos sobre la superficie de la cual se quiere conocer la deformación, es por medio de adhesivos o cementos. Unicamente los ID sol dables y embebidos no se incluyen en esta técnica. Se advierte que puesto que la resistencia de un ID de hojuela o alambre tiene una precisión de alta calidad, es muy importante elegir un método de montaje apropiado y un adhesivo adecuado. El adhesivo, juega un papel clave en el sistema de medición de deformación, puesto que debe transmitir sin dis torsión lo que suceda en la superficie. Se puede pensar que con un adhesivo resistente (duro) sería suficiente, sin embargo experimentos muestran que tales adhesivos influyen aparentemente en el factor del indicador, en las caracterís-ticas de histéresis, en la resistencia a la relajación de esfuerzos, en la resistencia del indicador y de su propio aislamiento.

Antes de colocar o montar el ID sobre cierta superficie, ésta debe ser preparada, removiendo pintura, corrosión, grasa, suciedad, etc. Las dos primeras impurezas se eliminan lijando la superficie hasta alcanzar uniformidad, sin llegar a tener un área altamente pulida. Después se utiliza un solvente para quitar grasas o aceites, inmediatamente se aplica una solución básica para dar a la superficie la afinidad apropiada para el pegado. Si la superficie es prepara da y la colocación del ID es retardada por cierto tiempo, se debe entonces cubrir temporalmente con vaselina, después, cuando se vaya a montar el indicador, se remueve la vaseli-

na con toluol y acetona ó tricloroetileno (p. ejemplo).

Hecha la preparación de la superficie, el siguiente paso es unir el indicador a ésta a través del adhesivo. Puesto que no se debe tocar nunca con los dedos las superficies a enlazar (la del espécimen y la de hojuela del indicador) es posible utilizar una cinta adhesiva transparente que nos ayude a trasladar el indicador y llevarlo al lugar de colocación previamente marcado. Con esta técnica podemos simi-lar la colocación de los ID y así rectificar su posición antes de aplicar el pegamento (Fig. C.1)

Así pues, se aplica entonces una cantidad excedente de pegamento o adhesivo sobre la superficie en donde se colocará el indicador; al proporcionar una determinada presión entre el indicador y la superficie a temperatura adecuada -según el cemento utilizado-, el sobrante de adhesivo fluirá hacia afuera. Es importante, que el secado a temperaturas mayores que la del ambiente (curado) sea cuidadoso, puesto que el adhesivo se expandirá con el calor, experimentará una reducción del volumen debido a la polimerización, , presentará una contracción al enfriarse, y en ocasiones un encogimiento después del curado. Además, puesto que el adhesivo es suficientemente fuerte para controlar la deformación del elemento sensor en el indicador, algún esfuerzo residual en el adhesivo influirá en la salida del ID. Si se intenta una medición de deformación a largo término con un adhesivo que no tiene un curado completo, la estabilidad del indicador será perjudicada seriamente y la precisión de la medición inconveniente.

Se dispone de una gran variedad de adhesivos para la unión de ID. El tipo y los procedimientos para aplicarlo en la instalación del indicador dependen de la selección

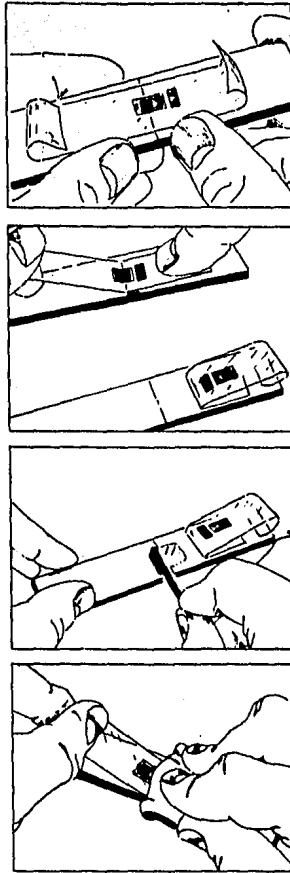


Fig. C.1 Método de instalación con cinta adhesiva para los ID de hojuela-metálica.

del propio ID y su portador-base, de la deformación máxima que se medirá, del material del espécimen, y de los valores de humedad y temperatura de operación esperados. El fabricante proporciona los detalles de estos procedimientos o métodos.

### Adhesivos

Se puede agrupar a los adhesivos de uso común en tres clases:

- a) cementos de celulosa-acetona y acetato-butyl-acetona
- b) cementos de polimerización
- c) cementos cerámicos.

Los de la primera categoría consisten en general de una buena parte de solvente (p. ej. 85%) y la restante de sólidos o sea una cantidad considerable de solvente se debe remover por evaporación; sin embargo los solventes de acetona secan rápidamente a temperatura ambiente -inclusive en 10 minutos es posible utilizar los indicadores después de ser pegados-, y requieren poca presión.

En el caso de los nitratos de celulosa es preferible curar a 54°C aproximadamente uno o dos días. También, es necesario permeabilizar después de haber secado el adhesivo para evitar que absorba agua de la atmósfera y el cemento no se expanda.

Algunos de los cementos de polimerización endurecen a la temperatura ambiente, aunque requieren una presión mayor

al realizar el empalme. Entre estos adhesivos se encuentran los epoxis, que exhiben mayor fuerza de pegado que estos adhesivos; como se sabe, se componen normalmente de un monómero o base epoxy y un agente endurecedor, la mezcla de estos induce la polimerización. Se puede emplear una sustancia de tipo amino que produce calor a través de una reacción exotérmica acelerando el proceso de curado.

También hay cementos de polimerización que tienen que secar con temperaturas mayores a la del medio natural, por ejemplo la bakelita y ciertos epoxis. Los ID así unidos pueden operar a 10°C abajo de la temperatura de curado, y ésta última es posible que alcance valores de 320°C inclusive. La presión que se aplica al unir el ID y el espécimen varía de 1.5 kg/cm<sup>2</sup> a 7 kg/cm<sup>2</sup>. En la referencia de Lee & Neville se puede encontrar amplia información sobre las características y uso de los cementos de polimerización.

Los cementos cerámicos se endurecen con calor por métodos relativamente simples (horno eléctrico y lámparas infrarrojas) o por un proceso de esparcimiento de flama. El tiempo de curado puede variar de 5 minutos a 70 horas-dependiendo del cemento utilizado- sin requerir presión.

Después del curado, la instalación debe ser impermeabilizada a la humedad para evitar la hinchazón del cemento, la reducción del aislamiento resistivo, y la condensación de la humedad sobre el material sensor de la deformación. Los componentes impermeabilizantes incluyen ceras de parafina, gomas de silicón, barnices y ciertas resinas. Una capa delgada de vaselina es posible utilizar como impermeabilizante para proteger en períodos cortos y a temperaturas ambiente.



Obtenida la colocación del ID en la superficie deseada, y habiendo efectuado el procedimiento más ventajoso de pegado, es sustancial revisar si la unión entre el ID y el espécimen es efectiva. Se debe llevar a cabo una inspección para averiguar si existen espacios de vacío entre el indicador y la superficie que lo soporta y si el adhesivo secó completamente. Estos huecos aparecen debido a burbujas de aire que tiene el pegamento así como a la liberación de cuerpos volátiles que aparecen durante el proceso de curado.

Estos espacios se pueden detectar con facilidad recorriendo suavemente sobre la superficie del indicador una goma-borrador; si existe algún cambio en la señal de salida sin haber deformado la superficie del espécimen, éllo indicará que existe un espacio vacío.

Para verificar si el curado (o endurecido) del cemento se completó, se mide la resistencia entre la red del indicador y el espécimen. Normalmente los valores son del orden de 10,000 M $\Omega$ ; cuando aparecen valores de 100 a 1000 M $\Omega$  es preciso ampliar la duración del proceso de curado. Otra forma para saber si el secado del pegamento se cumplió es aplicar un ciclo de deformación al espécimen, si después de este ciclo existe diferencia en la lectura de referencia que debe indicar cero puesto que no hay cambio en la deformación, se debe llevar al adhesivo a un ciclo de temperatura de postcurado.