



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

FACULTAD DE CIENCIAS

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN  
TRANSDUCTOR PIEZO – RESISTIVO**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
FÍSICO

PRESENTA  
SOSTENES MORALES LARA

TUTOR:  
FIS. ANDRÉS VALENTÍN PORTA CONTRERAS



2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Sostenes Murillo

FECHA: 13/ septiembre/ 2007

FIRMA: [Signature]

**1. Datos del alumno:**

**Morales**

**Lara**

**Sóstenes**

**51472855**

**Universidad Nacional Autónoma de México**

**Facultad de Ciencias**

**Física**

**078113499**

**2. Datos del tutor**

**Físico**

**Andrés Valentín**

**Porta**

**Contreras**

**3. Datos de sinodal 1**

**Físico**

**Raúl**

**Espegel**

**Paz**

**4. Datos del sinodal 2**

**Físico**

**Raúl**

**Reyes**

**Ortiz**

**5. Datos del sinodal 3**

**M en C.**

**Jordi Iñaki**

**Ausustrich**

**Senosianiin**

**6. Datos del sinodal 4**

**Dra.**

**Lucía**

**Medina**

**Gómez**

**Datos del trabajo escrito**

**Diseño y construcción de un transductor piezo – resistivo.**

**30p**

**2007**

**A mi esposa Graciela Mónica Hernández  
Y a mis hijas Victoria y Sofía  
Que siempre estuvieron conmigo.**

**A mis profesores:  
A todos los que contribuyeron a mi formación académica,  
en particular al Físico Andrés Valentín Porta Contreras  
por el apoyo y asesoramiento para esta tesis.**

**Al apoyo, por su tiempo y dedicación en la corrección de estilo a  
Nadia Huerta Sánchez.**

---

**“La ciencia es una pequeña vela  
que se ha encendido en pequeños periodos  
de la historia, pero basta tan sólo un pequeño  
soplido para que se apague y empiece  
de nuevo la oscuridad”  
Carl Sagan.**

ÍNDICE	Página
INTRODUCCIÓN.....	I
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES .....	1
EL MODELO.....	2
EL PROTOTIPO.....	4
FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALIBRACIÓN.....	7
EXPERIMENTOS PREVIOS.....	8
PRODUCCIÓN DE LOS SENSORES .....	11
CALIBRACIÓN DE LAS PRENSAS O TORNILLOS MECÁNICOS .....	13
CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES .....	13
CAPÍTULO 2. DATOS, GRÁFICAS Y RESULTADOS.....	14
SENSORES.....	17
CAPÍTULO 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.	
RESORTES.....	27
MUESTRAS.....	27
CONCLUSIONES.....	29
SUGERENCIAS .....	30
BIBLIOGRAFÍA .....	30
DIRECCIONES ELECTRÓNICAS .....	30

## **INTRODUCCIÓN**

El caso que dio origen al desarrollo de esta tesis responde a la necesidad de resolver el problema de medir y controlar la presión que aplica la herramienta terminal de un brazo robótico. El presente trabajo describe el desarrollo de un sensor de presión como una aplicación de algunos conceptos físicos para detectar la presión que ejercen ciertos instrumentos sobre los objetos con los que interactúan.

Se parte de la definición de presión y de las propiedades específicas de ciertos materiales para diseñar, construir y evaluar un prototipo de sensor piezo - resistivo. Se propone un modelo teórico de primera aproximación que permite justificar el funcionamiento del dispositivo y que de hecho, fue la base para desarrollar la idea primaria y justificar las variantes que se probaron.

Como ocurre con frecuencia en el diseño de dispositivos de este tipo, la mayor parte de las variables físicas que intervienen en el modelo, quedan consideradas en el trabajo experimental como una constante de calibración; constante que es particular para cada dispositivo.

Por supuesto, existen dispositivos, incluso algunos de ellos comerciales con características semejantes, pero que se desarrollan utilizando tecnologías diferentes, y que en general requieren del uso de técnicas más complejas para su producción; un ejemplo claro, para este caso, son los sensores de presión de películas delgadas.

Además de la aplicación que motiva este trabajo, los resultados obtenidos con algunas modificaciones, permiten aplicar potencialmente este dispositivo para resolver otras necesidades como: su uso en prótesis de brazo con sensores de tacto, sistemas automotrices inteligentes, etc.



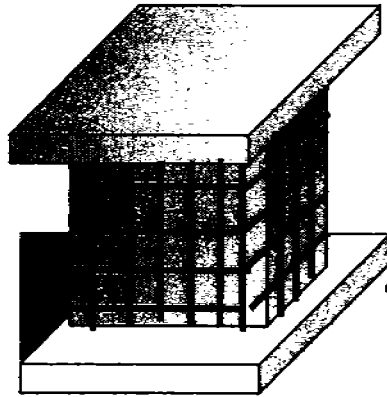
## **CAPITULO 1. ANTECEDENTES.**

Tal vez, el antecedente más antiguo de un sensor de presión de este tipo, se encuentra en el primer micrófono; diseñado por Graham Bell, quién necesitó convertir las variaciones de presión atmosférica (presión acústica), en una señal eléctrica que pudiera transmitir con su teléfono. Tal sensor estaba formado por gránulos de carbón, en contacto con una membrana que se desplazaba con el golpe de presión que producía la voz; lo que resultaba en la compresión de los granos de carbón, aumentando su conductividad y haciendo que fluyera una mayor cantidad de corriente. Este transductor modulador, reproducía con cierta fidelidad la voz humana.

Desde entonces, se han realizado muchos esfuerzos para medir variaciones de presión en diferentes intervalos. Existen, en consecuencia, muchos transductores sensores de presión, no solo para registrar la voz, sino en general para convertir la presión o sus variaciones en corriente eléctrica, mismos que se emplean en el estudio y en el control de diferentes fenómenos físicos.

Existen básicamente dos formas de medir la presión, la primera es recurrir a la definición; esto es, medir la fuerza aplicada por unidad de área (que se expresa en  $N/m^2$ ). A ésta se le conoce como presión absoluta. En la práctica, esto se logra al comparar la presión contra la presión de un recipiente con vacío absoluto. La segunda, con respecto a una presión de referencia, como la presión atmosférica; en cuyo caso se considera que es una medida diferencial, o relativa, que se puede expresar en diferentes unidades. y en donde es necesario indicar la referencia con respecto la cual se está comparando.

Entre los muchos desarrollos realizados, deben mencionarse los trabajos de Lambcombe que en 1981, diseñó un sensor piezo - resistivo de grafito en forma de emparedado, como se muestra en la siguiente figura.



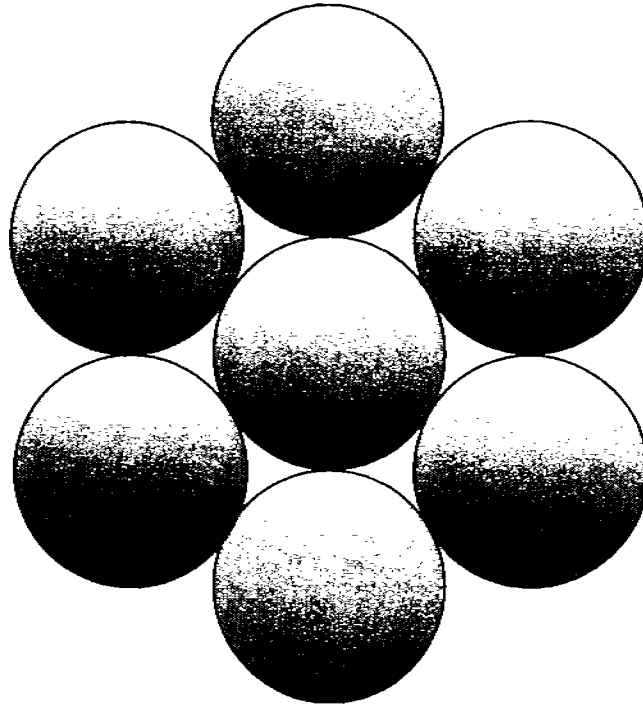
**Figura 1. Arreglo del transductor de grafito de Lambcombe. El grafito está confinado en una malla de alambre para evitar que cambie la masa.**

El dispositivo que se desarrolló se basa en el cambio de resistencia, debido a la variación del área de contacto entre las partículas de grafito que componen el material sensible. Para manejar un intervalo amplio de valores de resistencia y adecuarlos a las dimensiones de los transductores, se experimentó con mezclas de diferentes proporciones, compuestas de polvo de grafito y materiales inertes; iniciando con algunos, tipo dolomitas, por ejemplo piedra pómez. Después de experimentar con diferentes materiales, para la versión final se seleccionó el polvo de mármol, ya que es fácil conseguirlo en grano muy fino y por su costo; amén de que los resultados obtenidos con la mezcla, tienen características estables y valores reproducibles.

#### **EL MODELO.**

En el modelo se consideró que todos los granos de polvo conductor se podían representar como esferas de un diámetro promedio, mismas que deberían tener un comportamiento equivalente al del conjunto de granos conductores de grafito, esto es, esferas de iguales dimensiones cuyo comportamiento es equivalente al de partículas irregulares con dimensiones dentro de un intervalo de diámetros, con el mismo efecto macroscópico medible en ambos casos.

Se considera que los granos del grafito son esferas de igual diámetro que estén en un empaquetado de mínimo volumen, cada una de ellas tiene un área de contacto  $A$ , en los puntos de tangencia, con cada una de sus seis primeras vecinas; que se encuentran en el mismo plano (véase la Figura 2).



**Figura 2. Puntos de contacto entre una esfera y sus seis vecinas en el mismo plano.**

Si se aplica un esfuerzo en la dirección vertical, de acuerdo a la figura, y si se desprecia en una primera aproximación la posible deformación lateral, el esfuerzo induce una deformación sólo en la dirección en la que se aplica el estímulo, deformando cada grano de acuerdo a su módulo de Young  $E$ , y aumentando el área de contacto en una proporción que depende de la deformación  $\varepsilon$  inducida. La expresión analítica se deduce, de acuerdo a: (véase la Figura 3).

Sea  $2\varepsilon$  la deformación inducida en cada esfera al aplicar una fuerza  $F$  y sea  $r$  el radio de la nueva área de contacto, entonces:

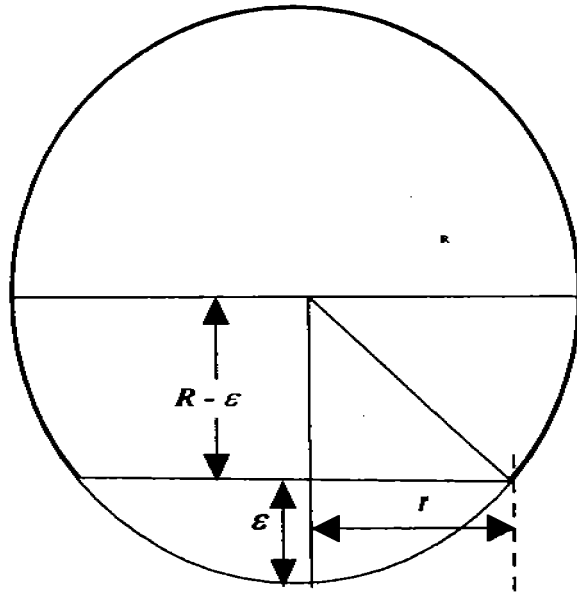
$$r = \sqrt{(2R - \varepsilon)\varepsilon}$$

y la nueva área de contacto es ahora:  $2\pi r^2$ , esto es:

$$A + \Delta A = 2\pi(2R - \varepsilon)\varepsilon,$$

y por lo tanto el incremento fraccional en el área es:

$$\frac{\Delta A}{A} = 2\pi(2R - \varepsilon)\varepsilon - 1$$



**Figura 3**

Ahora como la conductancia es:  $G = \frac{\sigma(A + \Delta A)}{\varepsilon} = \sigma 2\pi(2R - \varepsilon)$

Finalmente como la deformación es  $\varepsilon = \frac{F}{E} = \frac{Pa}{E}$  (donde  $a$  es el área sobre la que se aplica presión) entonces la expresión final para la conductividad en función de la presión es:

$$G = 2\pi\sigma\left(2R - \frac{Pa}{E}\right)$$

Para algunas muestras no se usó la constante de restitución o el módulo de Young del grafito, en vez de ésta se utilizó la constante de restitución del sustrato donde se depositó la mezcla de polvos conductores.

#### EL PROTOTIPO.

El prototipo desarrollado para este trabajo, considera la idea original de Bell con una serie de modificaciones que permiten, entre otras cosas, tener un control de la resistencia de cada sensor en particular. A continuación se hace una síntesis de la forma como se construyeron las muestras.

Para la producción del sensor piezo - resistivo optamos por la preparación de la mezcla de polvos de grafito y de mármol en diferentes proporciones; con lo cual es posible tener un control sobre la resistencia total del arreglo.

Se presentan dos opciones para vencer la elasticidad del sensor, esto es que, en un caso la fuerza y la presión aplicadas, se utilicen para deformar las esferas de material conductor, debido a que su módulo elástico es mayor que el del contenedor y en el otro, la situación se invierte, esto es, que el material del contenedor tenga una constante de restitución más grande. Debido a esto se tomaron en cuenta ambos casos, por lo que se utilizaron contenedores de diferentes módulos elásticos como el vinil, evax (polímero sintético), poliuretano esponjoso, silicón y simón (pegamento de poliuretano), sácate y estopa; los cuales pasaron por pruebas para elegir cual mostraba mejor restitución.

Para los contactos eléctricos, en cuatro muestras se emplearon láminas de cobre con diferentes espesores, y en las restantes se utilizó un substrato de fibra de vidrio recubierto con cobre por ambos lados; esta decisión fue consecuencia de que al aplicar la tensión las láminas de cobre se deformaban. A estas placas se soldaron cables trenzados planos con 5 mm. de ancho.

Como todo aparato de medición, se necesita calibrar respecto a un patrón arbitrario y para este fin, optamos por el diseño y armado de una prensa o tornillo mecánico que funcionara de forma manual, aplicando una fuerza constante de manera controlada como se muestra en la Figura 4. Este dispositivo está formado por un cilindro que se barrenó por un extremo y se machueleó por el otro, para de encordar un tornillo, con un paso de rosca conocido, el cual varía de prensa a prensa. Se usaron varios resortes para hacer las pruebas iniciales, seleccionando tres con los que se fabricaron tres cilindros para intercambiarlos y modificar la presión que se aplica a las muestras. Cada resorte tiene en los extremos insertos de metal en forma de tapas o soportes metálicos, para evitar que el tornillo se atore cuando gira. En la Figura 5 se muestra una fotografía del cilindro y sus componentes y en la Figura 4 se pueden observar las medidas del aparato de calibración.

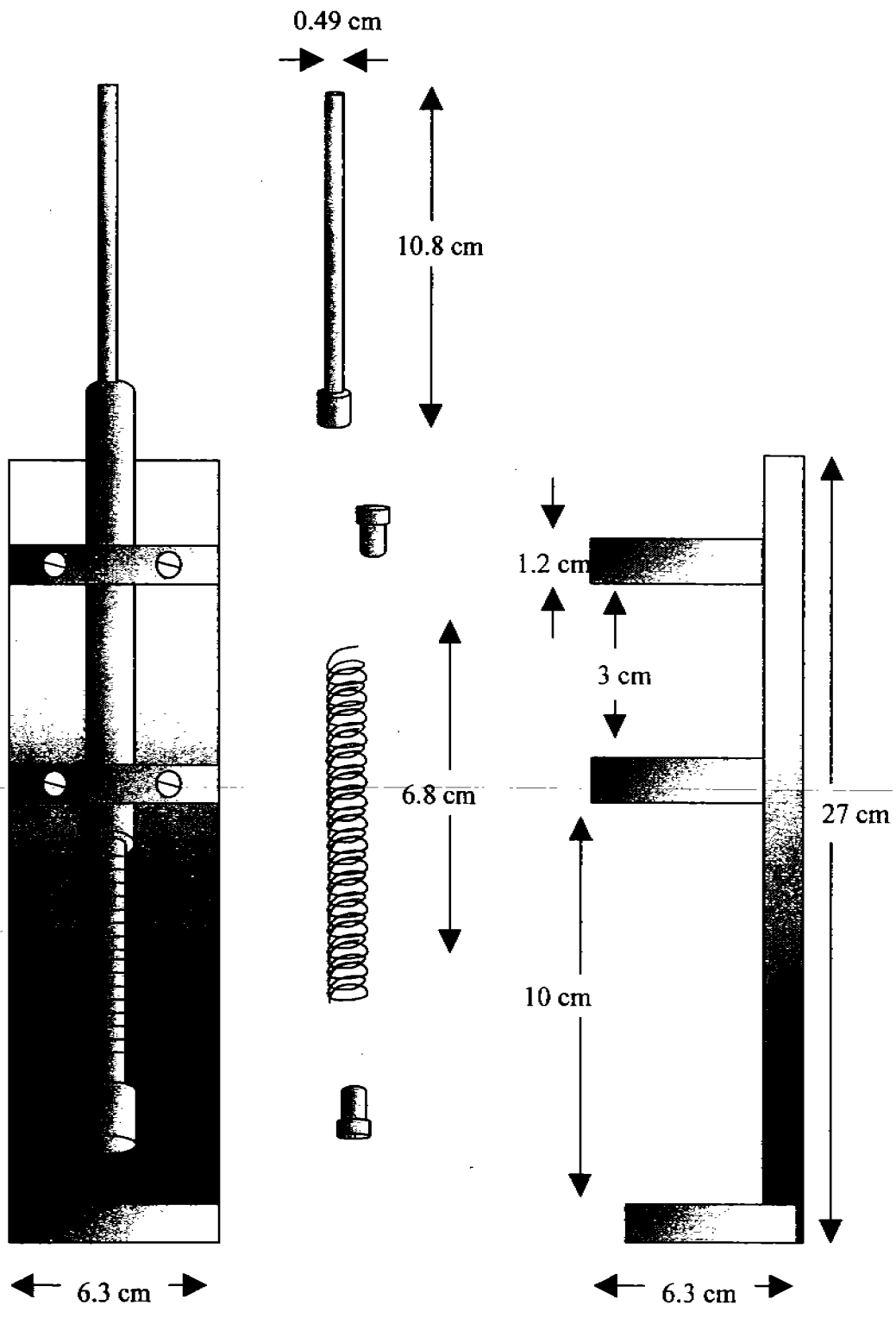


Figura 4. Esquema con las dimensiones del sistema de calibración

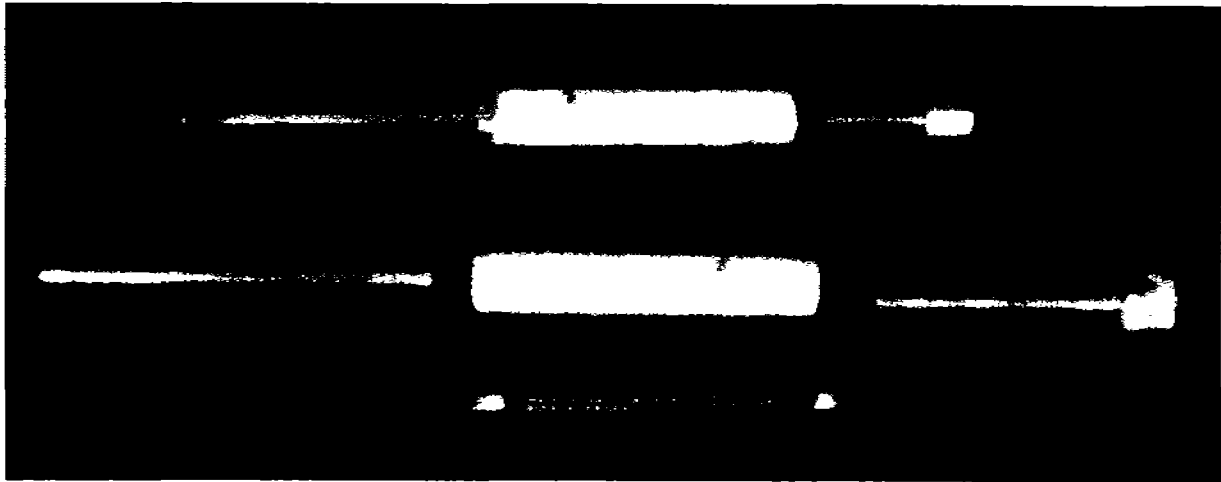


Figura 5. El cilindro que aplica la presión sobre las muestras y todos sus componentes

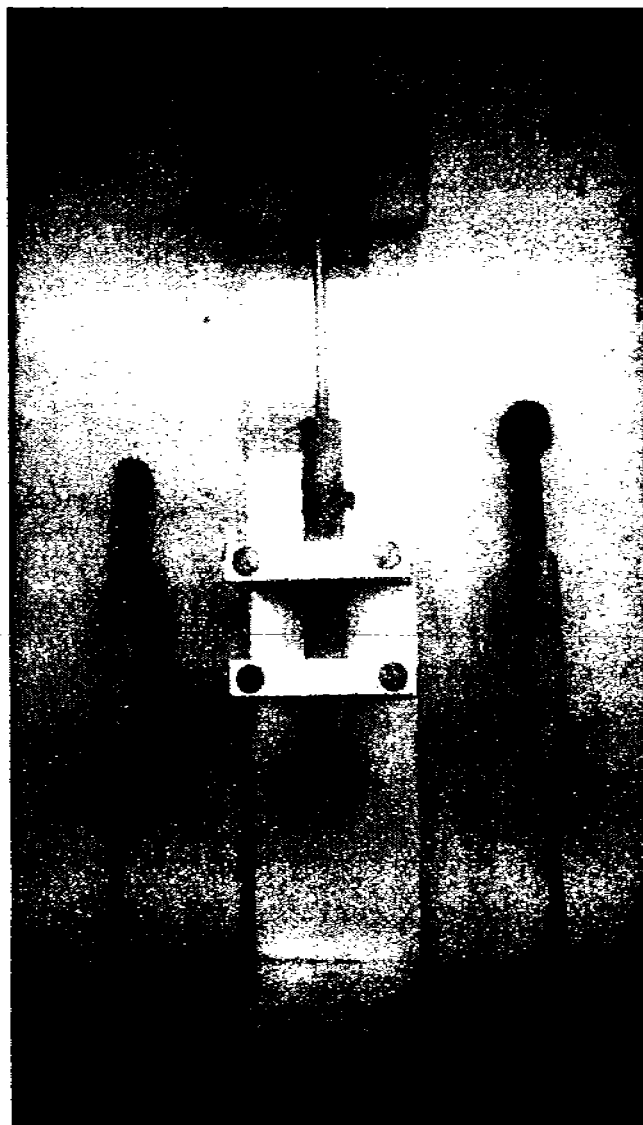
#### FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALIBRACIÓN.

Para calibrar las muestras que funcionarán como transductores, se utiliza la prensa descrita en el párrafo anterior para aplicar presión. La prensa, que es la parte medular del sistema de calibración, funciona por la fuerza que ejerce el resorte sobre el émbolo con el que está en contacto. Inicialmente se aplica el extremo del émbolo sobre la muestra, manteniendo el resorte sin compresión, de forma tal, que solo el peso del émbolo actúa sobre la muestra produciendo una presión que es el peso  $w$  del émbolo dividido entre el área de su sección transversal.

Al comprimir el resorte con el tornillo se aplica una fuerza adicional que esta dada por la relación  $F = k x$  que depende del desplazamiento del tornillo sobre el cilindro. Como se conoce el paso de rosca del tornillo se puede determinar su avance por vuelta y en consecuencia saber cual es el valor de  $x$  que determina el aumento en la presión que se ejerce sobre la muestra. A simple vista se puede determinar un giro de 90 grados, esto es, un cuarto de vuelta, con lo cual se pueden aplicar presiones en un intervalo amplio y calibrar el transductor.

Se requiere determinar la constante de restitución del resorte; para lo cual se procede a montar un arreglo como el de la figura seis, en la que se muestra una fotografía del sistema con el cilindro y el tornillo invertidos y en la parte superior del émbolo se coloca

una placa o mesa de acrílico sobre la que se colocan diferentes pesos calibrados que comprimen al resorte. Midiendo la compresión y el peso aplicado se puede obtener una gráfica de  $F$  vs  $x$ ; cuya pendiente corresponde al valor de la constante de restitución del resorte.



*Figura 6. Arreglo para la determinación de la constante de restitución del resorte.*

#### EXPERIMENTOS PREVIOS.

En la primera etapa se experimentó con todos los materiales sintéticos citados, y determinar cual es el más indicado para construir el sensor. Se hicieron cortes de



diferentes formas y diámetros, descartando las geometrías que resultaban difíciles de manejar y aquellas en las que la restitución era más difícil de evaluar. Se contaminó el material que sirve de sustrato con la mezcla de grafito y mármol y se observó como cambia la resistencia eléctrica del arreglo, al presionar las placas de cobre, colocadas en los extremos de las muestras.

La contaminación consistió en permitir que el polvo de la mezcla penetrara en los poros del sustrato de manera uniforme. Para lograr este efecto se depositó el sustrato en un frasco con los polvos y se agitó a intervalos de tiempo regulares, y se dejaron reposar por veinticuatro horas.

En una segunda etapa se trabajó con aglutinantes (pegamentos poliméricos) poliuretano y silicón con la mezcla de los polvos, previamente obtenidas. La revoltura de los componentes se llevó a cabo en un frasco que hacía las funciones de matraz, la mezcla obtenida se moldeó por un periodo de tres ó cuatro días para garantizar la estabilidad del arreglo. En esta parte del experimento se obtuvieron veinte muestras pero solo se marcaron dieciséis, cuyas características se presentan en la Tabla 1. Las otras cuatro muestras (estopas y zacates) se desecharon por presentar características no reproducibles.

---

**TABLA 1. PRUEBAS PREVIAS A LA ELABORACIÓN DE LOS SENSORES.**

MATERIAL OCUPADO EN LA ELABORACIÓN DE LOS SENSORES	NUMERO DE MUESTRA															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Muestra																
vinil	si	si	si	si	no	no	no	no	no	si	no	no	no	no	si	si
pegamento simón	no	no	no	no	no	no	no	si	no	si	si	si	no	no	si	si
polvo de grafito	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
polvo de mármol	no	no	no	no	no	si	si	si	no	si	si	si	si	si	si	si
silicón	no	no	no	no	no	si	no	no	no	no	no	no	si	no	no	no
mica	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	si	no	no	no	no
diámetro del sensor (cm)	0.5	0.7	0.7	1.2	1.5	1.2	1.2	2	1.4	2.4	2	2.5	2.2	1.3	1.3	1.5
espesor de la lamina de cobre (cm)	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	0.02	0.02	0.02	0.02
espesor del material sintético (cm)	0.4	0.4	0.8	0.4	0.2	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	1.6	0.9	0.4	0.4	0.3
vinil esponjoso	no	no	no	no	no	no	no	no	si	no	no	no	no	si	si	si
Evax (polímero)	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	si	no	no	no	no	no
diámetro del sacabocado	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	0.6	0.6	0.6	0.6
Proporción de la mezcla de polvo de mármol y grafito *	no	no	no	no	no	no	no	2 a 1	no	2 a 1	2 a 1	2 a 1	2 a 1	1 a 1	1 a 1	2 a 1
*si presencia del material, no ausencia del material																

## PRODUCCIÓN DE LOS SENSORES.

Las proporciones de la mezcla empleada para cada muestra se reportan en la Tabla 2; y se utilizaron cuatro técnicas:

- En la primera se colocó la mezcla en una cavidad practicada en el centro del sustrato. La forma de producción fue la siguiente, se adhirió al material una lámina de cobre y se dejó secar por un día para lograr un buen sellado. Después se colocó la mezcla previamente seleccionada, para que se forme una estratificación y así mantener más uniforme el material, evitando que se formen burbujas que hagan inhomogénea la muestra. Esta es una técnica común cuando se polimerizan placas gruesas.
- En la segunda, se ocuparon esferas de unicel y evax que se recubrieron con el material conductor. Estas esferas se colocaron en la cavidad del sustrato, que posteriormente se tapó con un electrodo de cobre. El sensor ya terminado, se dejó sellar por dos ó tres días para hacer las pruebas correspondientes.
- En la tercera técnica se desarrollaron láminas de aglutinante, contaminadas con la mezcla, que se moldearon por un tiempo equivalente al del procedimiento de la técnica anterior.
- Por último trabajamos con un sensor cuyas paredes que se moldearon con silicón líquido, para no tener deformidad al momento de adherir las placas de cobre y lograr un contacto uniforme con la mezcla de polvos previamente depositados en la cavidad.

**TABLA 2. PARÁMETROS DE LAS MUESTRAS.**

No. de Muestra	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Dimensiones	largo X ancho (cm)	largo X ancho (cm)	largo X ancho (cm)	largo X ancho (cm)	largo X ancho (cm)	diámetro (cm)	diámetro (cm)	diámetro (cm)	largo X ancho	largo X ancho	largo X ancho	largo X ancho	largo X ancho	diámetro (cm)	diámetro (cm)
PLACA 1	2X1.9	2x1.6	2x2	2x2	2.5x2	3.8	3	2.5	2x2	1.6x1.8	.5x.5	2x2	2x2	3.5	2.6
PLACA 2	2.2X1.9	2x1.6	2.2x1.9	2x2.5	1.9x2	3.8	3	2.5	2x2	1.5x1.5	.5x.5	3x3	2x2.2	3.5	2.6
GROSOR DE LA PLACA	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	0.5	0.6	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8	1
SACABOCADO DEL SUBSTRATO	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1	1	0.6	0.6	.6	0.5	1	0.6	1	0.6
GROSOR DE LA LAMINA DE COBRE	0.19	.19cm	0.2	.19cm	0.2	0	0	0.02	0.19	0.02	0.02	0.02	0.19	0.02	0.02
VINIL	si	si	si	si	si	no	no	no	no	no	no	si	no	no	no
EVAX	no	no	no	no	no	no	no	si	no	si	no	no	si	no	no
SILICÓN	no	no	no	no	no	si	si	no	si	no	no	no	no	si	si
DIÁMETRO DEL SUBSTRATO	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	4.5	4.5	2.5	1.6	1.6	no	4x4.5	1.6	3.5x3.5	2.6
ELECTRODO	si	si	si	si	si	no	no	no	si	si	si	no	si	si	si
PLACA COLECTORA	no	no	no	no	no	si	si	si	no	no	no	si	no	no	no
PROPORCIÓN DE LA MEZCLA	2 a 1	3 a 1	3 a 1	grafito	3 a 2	2 a 1	2 a 1	1 a 1	1 a 1	1 a 1	2 a 1	2 a 1	2 a 1	2 a 1	2 a 1
UNICEL	si	no	si	si	si	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no

## CALIBRACIÓN DE LAS PRENSAS O TORNILLOS MECÁNICOS.

El procedimiento para la calibración de la prensa, consistió en invertir el cilindro en la misma, abriendo sus pinzas para colocar el cilindro previamente armado, el embolo quedó en la parte superior, con la mesa de acrílico inserta en la parte superior. Una vez hecho esto colocamos el cilindro en el soporte, en un punto que nos permitió tomar varias medidas. Se dispusieron dos cajas de juegos de pesas, las cuales se combinan para obtener las distintas fuerzas, necesarios en este experimento. Al colocar las pesas en la mesa de acrílico, se produce una variación de presión por el resorte del cilindro, reflejándose en un movimiento vertical, el cual se cuantifica con una regla dispuesta para tal fin. Los resultados obtenidos se presentan en las gráficas y tablas del Capítulo 2.

## CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES.

Una vez calibrada la prensa, se cuenta con la información necesaria para saber que presión se aplica por comprimir los resortes al girar el tornillo. El proceso fue el siguiente: se coloca el soporte horizontalmente, se aísla su superficie, la cual va tener contacto con el sensor, con el fin de no alterar la lectura. Igual que en la primera parte, se ajusta el cilindro, y se asegura con las pinzas del soporte. Posteriormente se coloca el sensor entre el émbolo y el soporte, se verifica que la punta del émbolo quede en el centro de este. Luego se conecta un multímetro al sensor para registrar la variación de la resistencia al momento de aplicar la fuerza debido al giro producido en el tornillo según sea el caso vueltas, medias vueltas, etc. Los resultados de **Presión vs Resistencia** se presentan y se discuten en el siguiente capítulo.

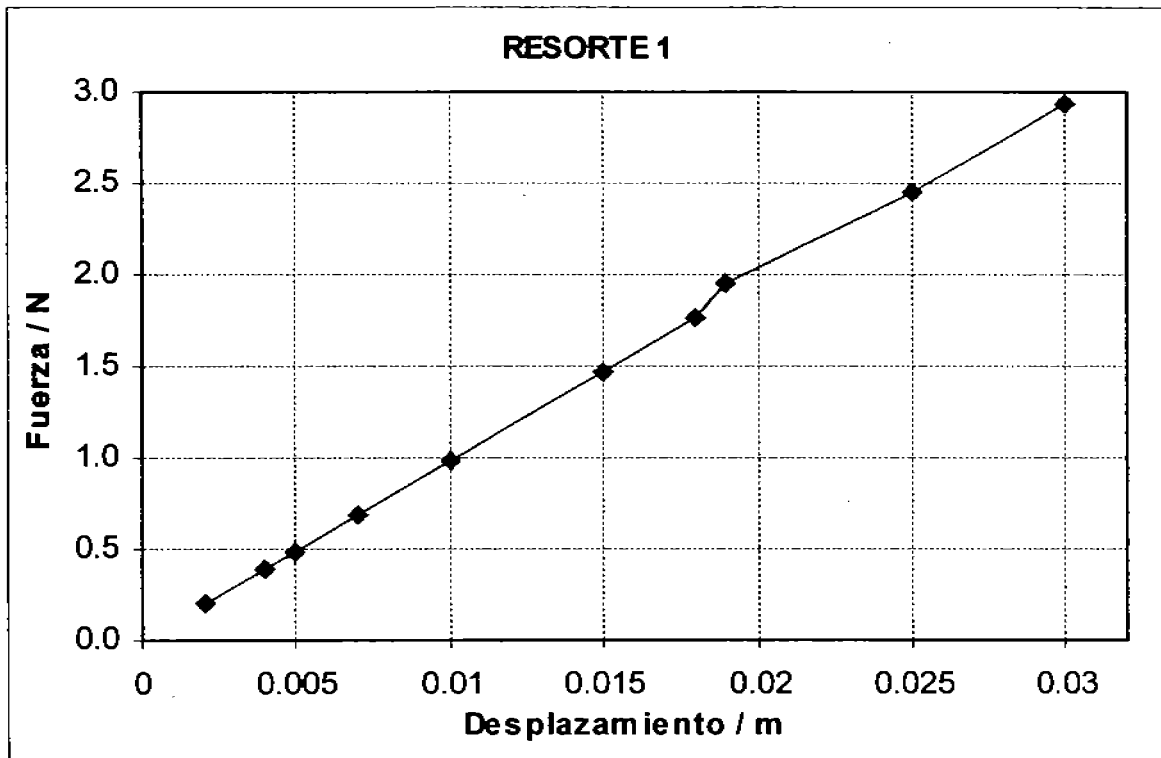
## **CAPÍTULO 2. DATOS, GRÁFICAS Y RESULTADOS.**

En este capítulo se hace una presentación sintética de los datos, gráficas y resultados obtenidos en el proceso de calibración del sistema y se presentan también las gráficas de la respuesta  $R$  vs  $P$  para cada transductor, junto con el análisis estadístico de cada conjunto de datos; de reportan los intervalos de respuesta.

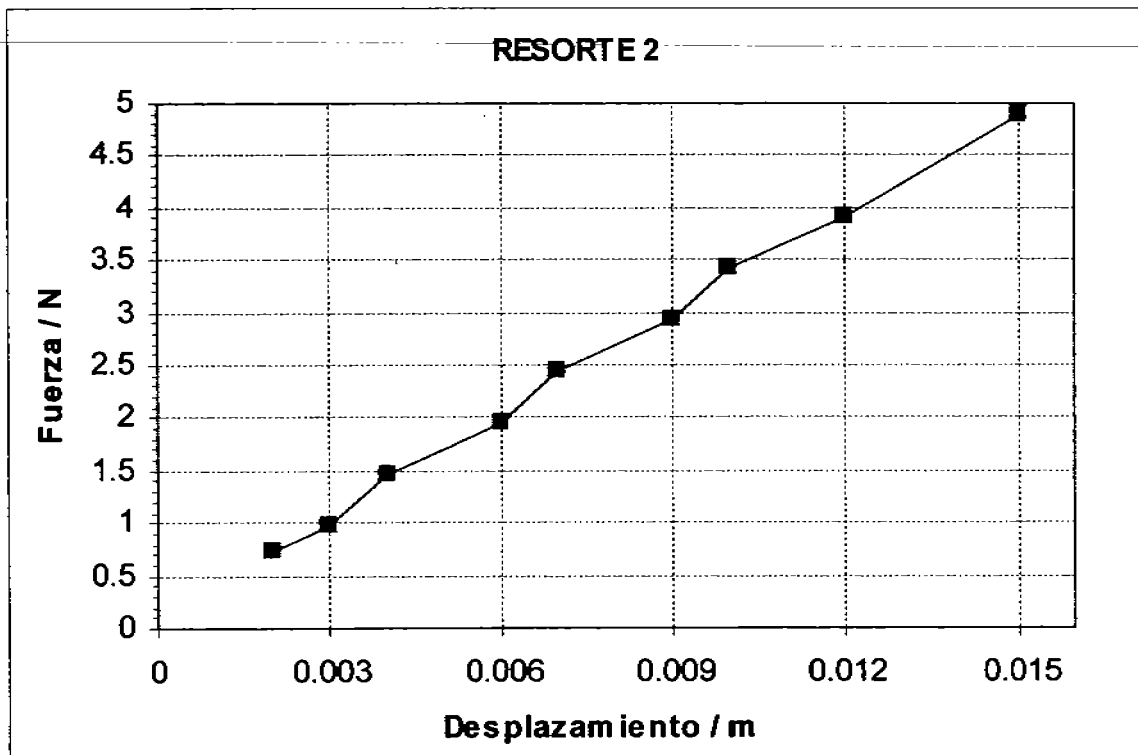
El trabajo de calibrar las prensas se redujo a determinar el comportamiento elástico de los resortes; esto es, a obtener la constante de restitución de cada uno de los tres resortes empleados. Para evitar errores de deslizamiento, cada resorte se instaló en un cilindro independiente, maquinado con las dimensiones adecuadas; apareando las piezas para evitar intercambios que produjeran falta de reproducibilidad en el comportamiento elástico.

Debido a que los resortes se comprimen como consecuencia del desplazamiento de los tornillos, lo cual implica un contacto entre partes que giran; se insertaron piezas lisas y planas terminales en los extremos de cada resorte, para evitar que se atoren o que cambie la fricción al accionar los tornillos.

Las constantes de restitución de cada resorte se obtienen de las pendientes de las gráficas  $F$  vs  $x$ . Los datos se ajustaron por mínimos cuadrados y se compararon con la pendiente promedio de cada punto en particular, obteniendo diferencias de máximo 7 %. En las Figuras 7, 8 y 9 se presentan las gráficas correspondientes; en la Tabla 3 los datos con que se construyeron. En la Tabla 4 se presentan los parámetros de regresión correspondientes al ajuste de mínimos cuadrados; las pendientes resultantes se usan como el valor representativo de la constante de restitución de cada resorte.



**Figura 7. Gráfica de calibración del resorte No. 1.**



**Figura 8. Gráfica de calibración del resorte No. 2.**

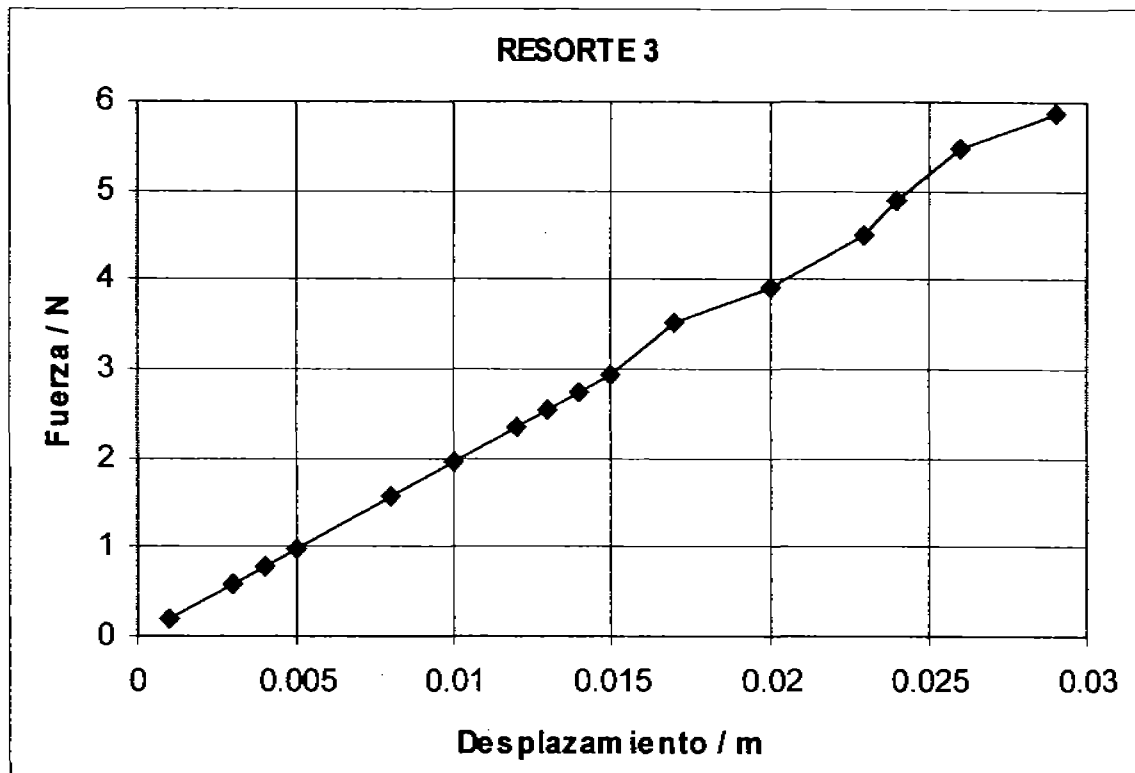


Figura 9. Gráfica de calibración del resorte No. 3.

TABLA 3. DATOS DE CALIBRACIÓN DE LOS RESORTES.					
RESORTE No.1		RESORTE No. 2		RESORTE No. 3	
Desplazamiento	Fuerza	Desplazamiento	Fuerza	Desplazamiento	Fuerza
m	N	m	N	M	N
0.002	0.2	0.002	0.73	0.001	0.2
0.004	0.39	0.003	0.98	0.003	0.59
0.005	0.49	0.004	1.47	0.004	0.78
0.007	0.68	0.006	1.96	0.005	0.98
0.01	0.98	0.007	2.45	0.008	1.56
0.015	1.47	0.009	2.93	0.01	1.96
0.018	1.76	0.01	3.42	0.012	2.35
0.019	1.96	0.012	3.91	0.013	2.54
0.025	2.45	0.015	4.89	0.014	2.74
0.03	2.93			0.015	2.93
				0.017	3.52
				0.02	3.91
				0.023	4.5
				0.024	4.89
				0.026	5.48
				0.029	5.87

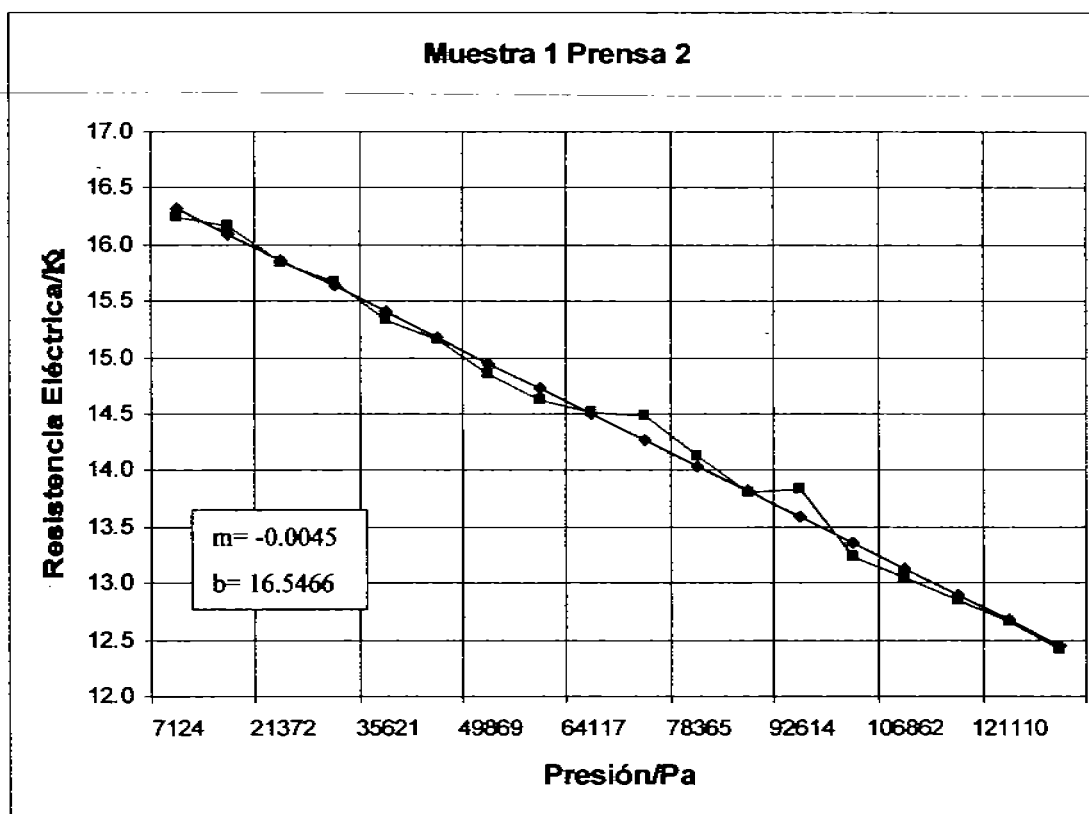


TABLA 4. PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL DE DATOS DE LOS RESORTES			
PARÁMETRO	RESORTE 1	RESORTE 2	RESORTE 3
PENDIENTE	98.47	321.18	204.65
ORDENADA	0.001	0.0998	-0.066

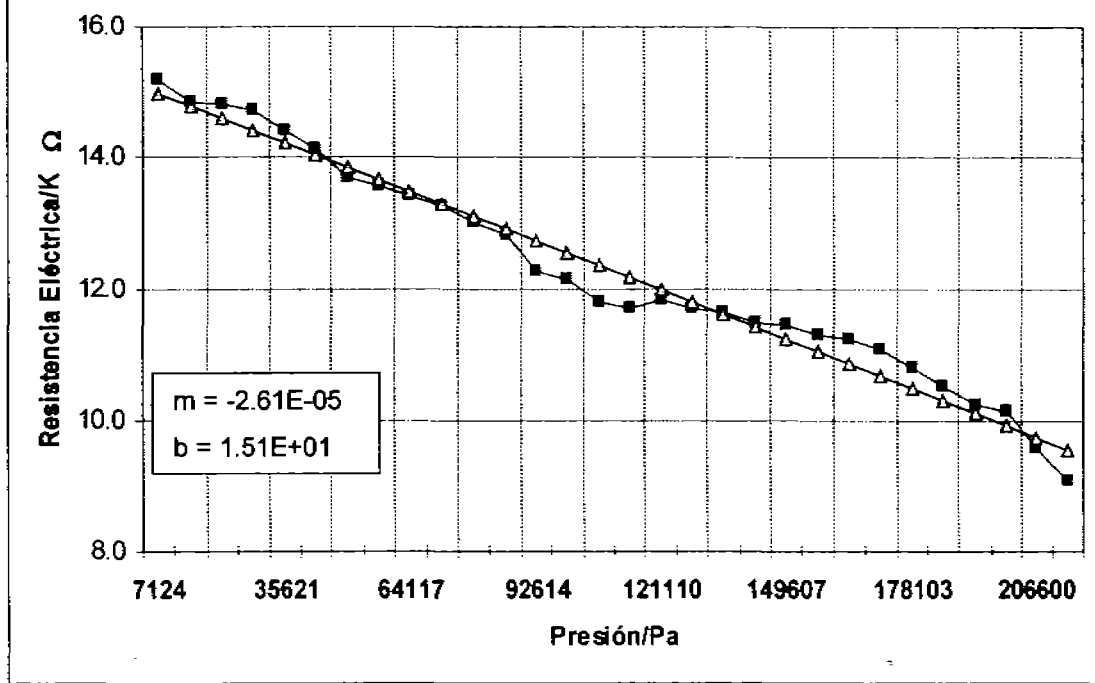
## SENSORES

Con los resultados de la sección anterior se determinó la presión que se aplicó a cada muestra para caracterizar su respuesta de **Resistencia vs. Presión**. Debe aclararse que de las dieciséis muestras preparadas, solo fue posible aplicar presión en quince de ellas; debido a que en el proceso se dañó una y no se pudieron completar las pruebas sobre ella. Esta muestra fue la No. 6 de la tabla 1. que en la Tabla 2 y en las gráficas ya no aparece registrada.

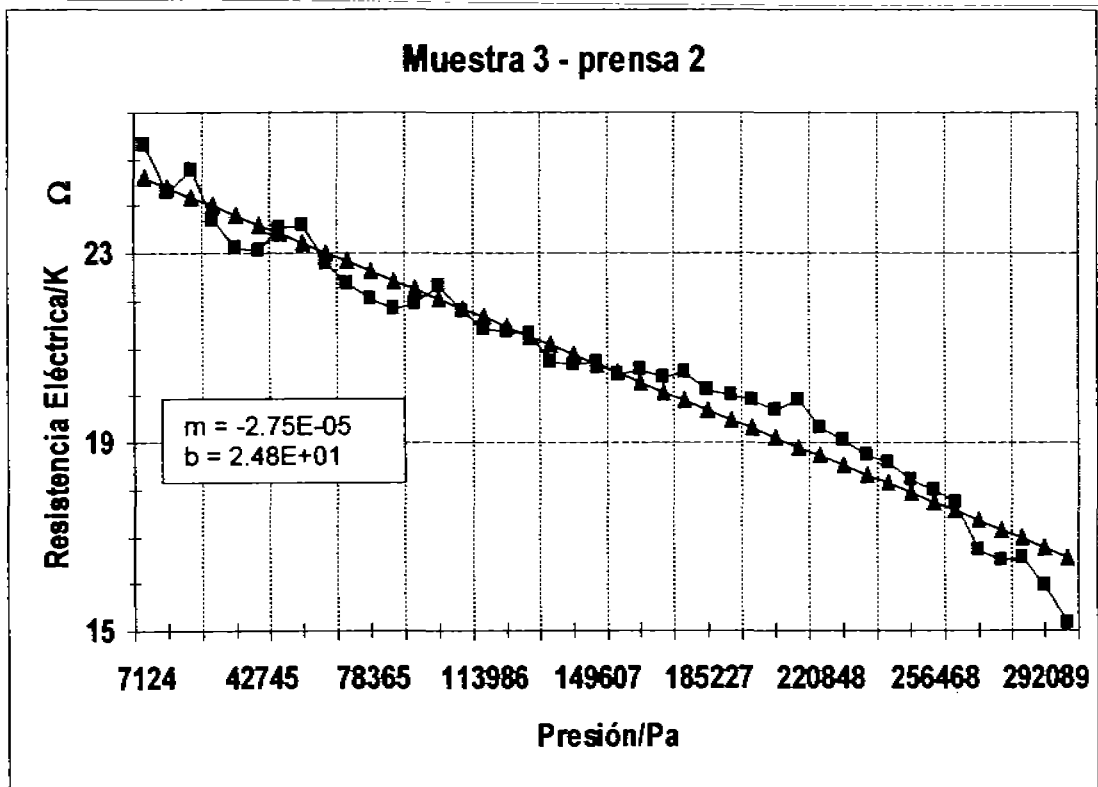
En cada caso las muestras se sometieron a un proceso de compresión con el sistema del cilindro y resorte. Los resultados de cada muestra se presentan en las siguientes gráficas. Se presenta también la recta ajustada y los parámetros de regresión.

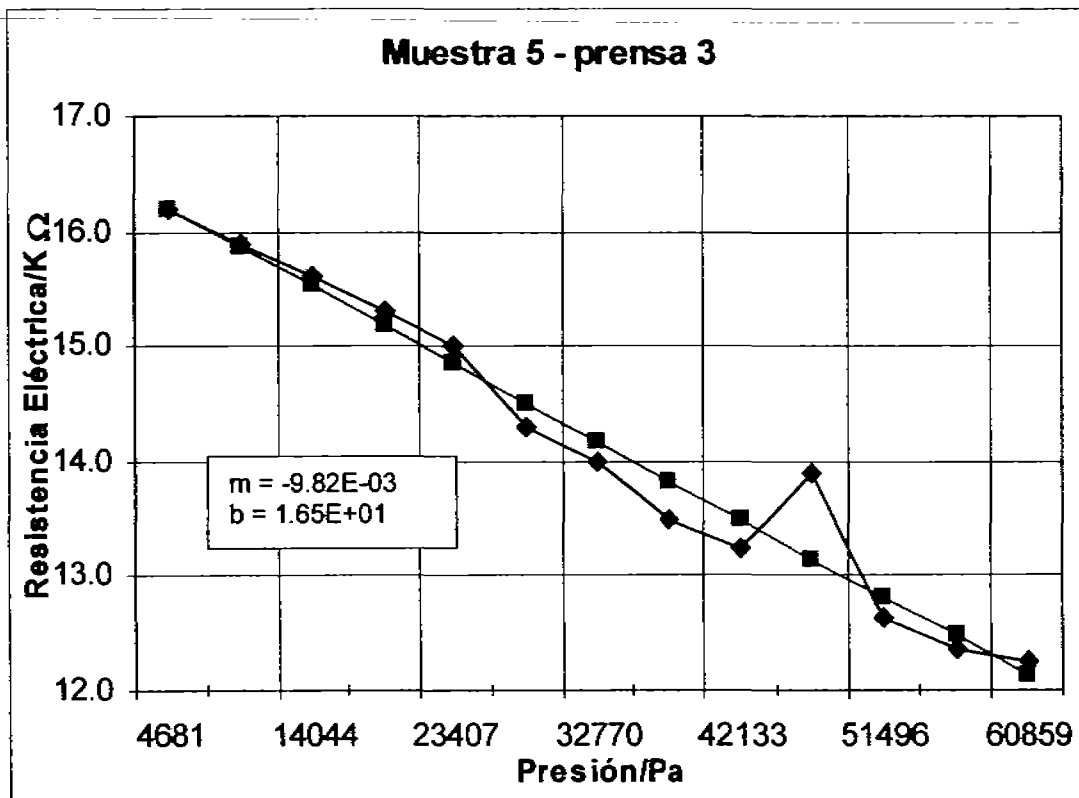
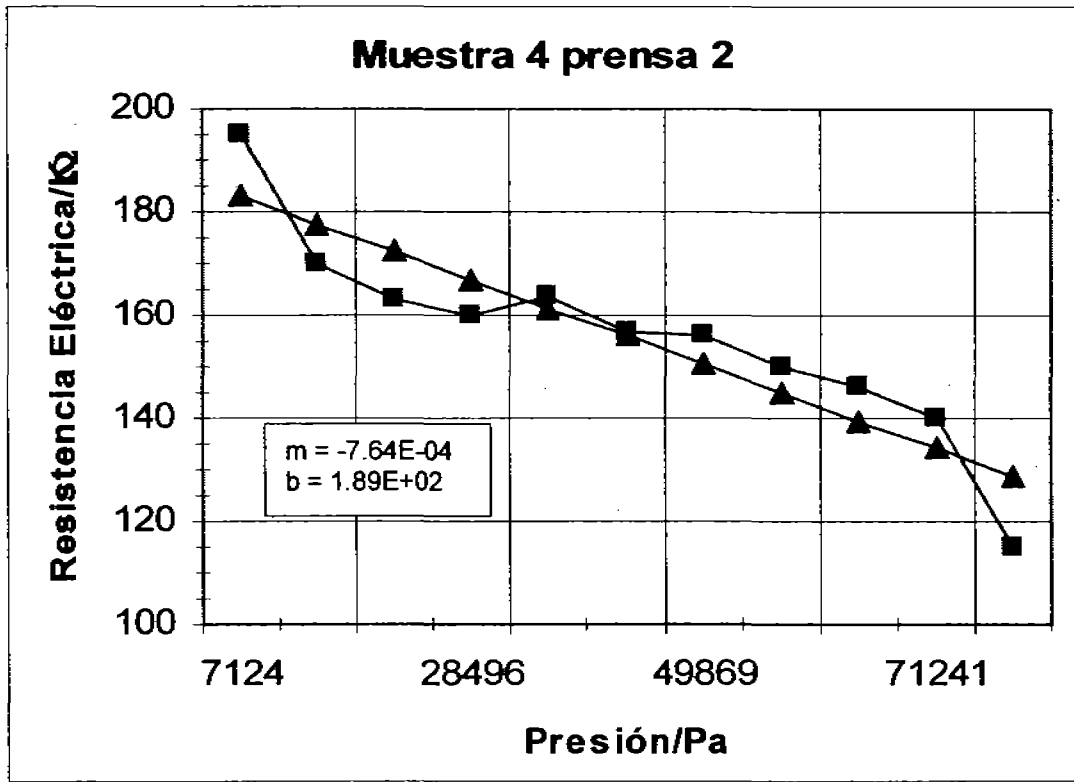


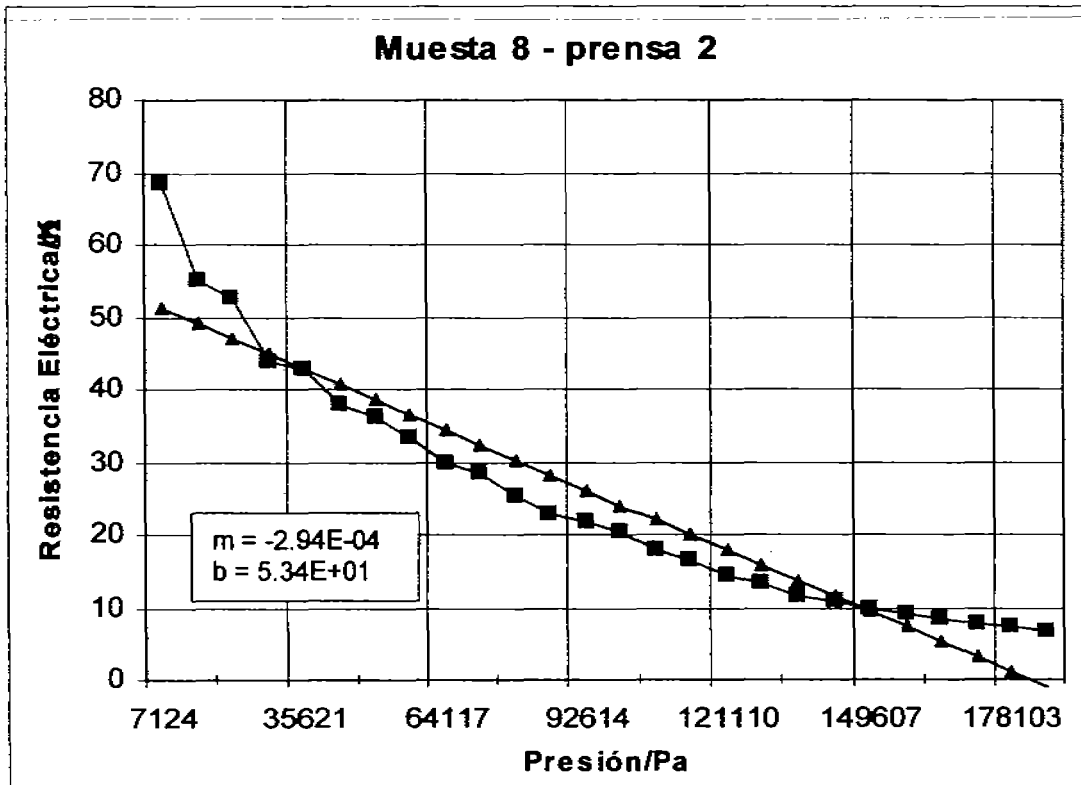
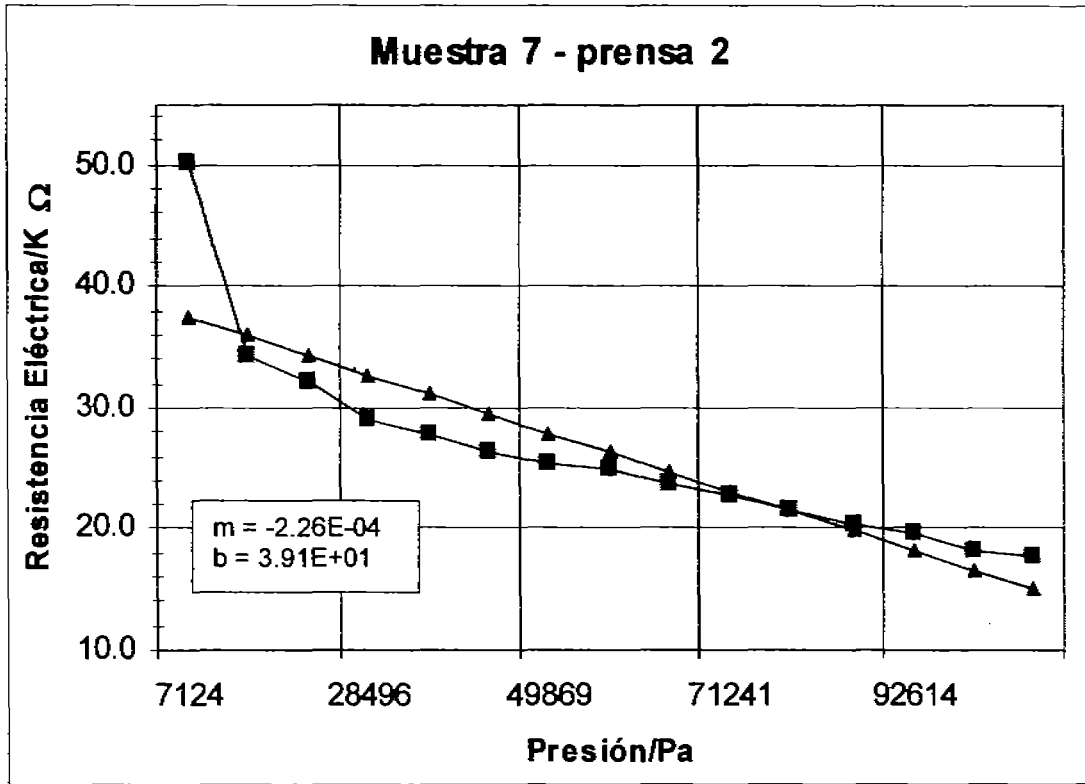
Muestra 2 - prensa 2

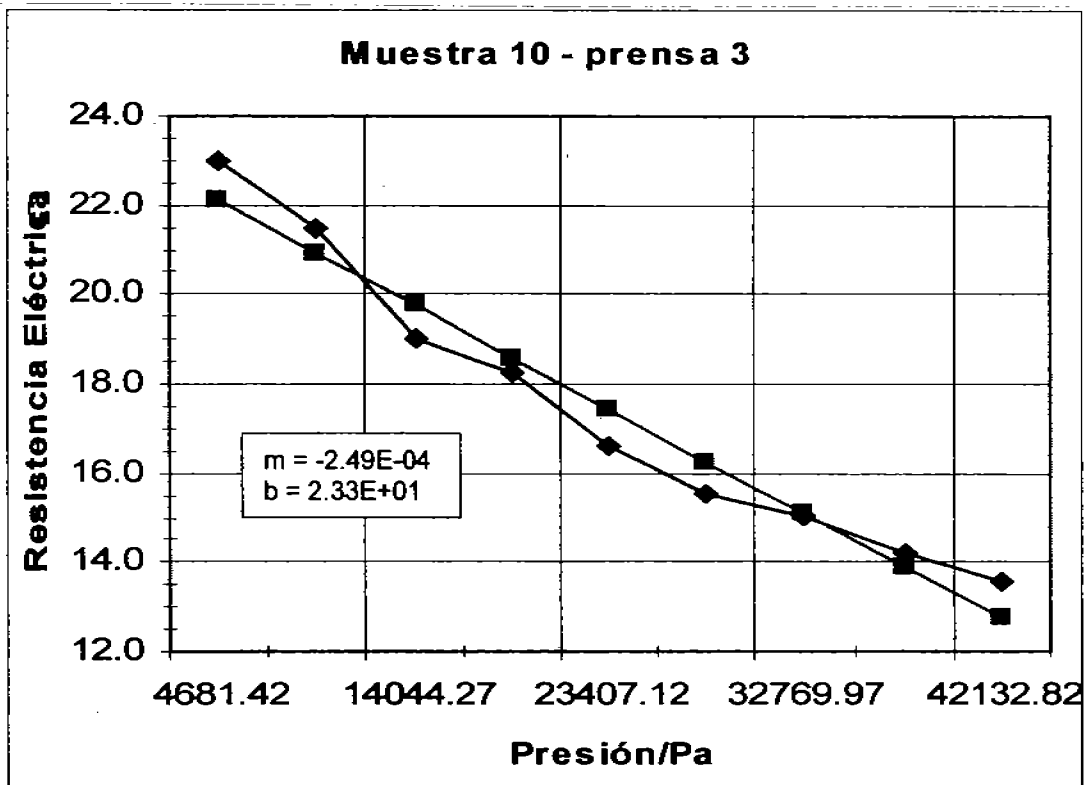
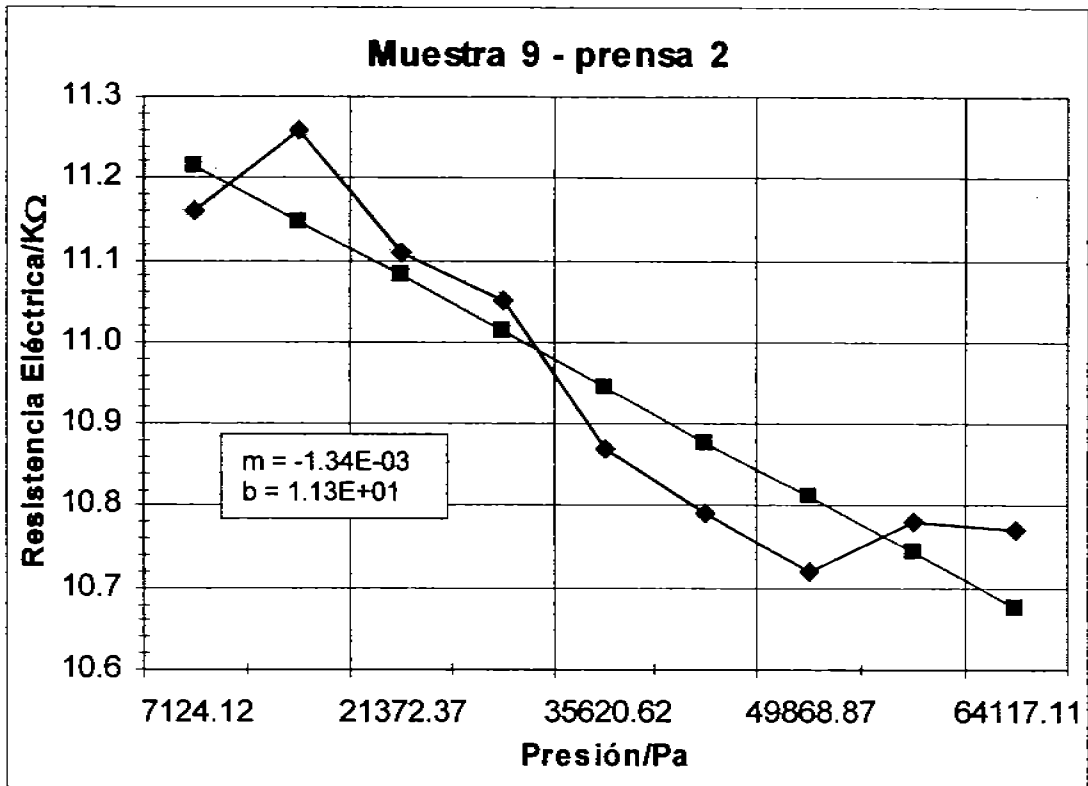


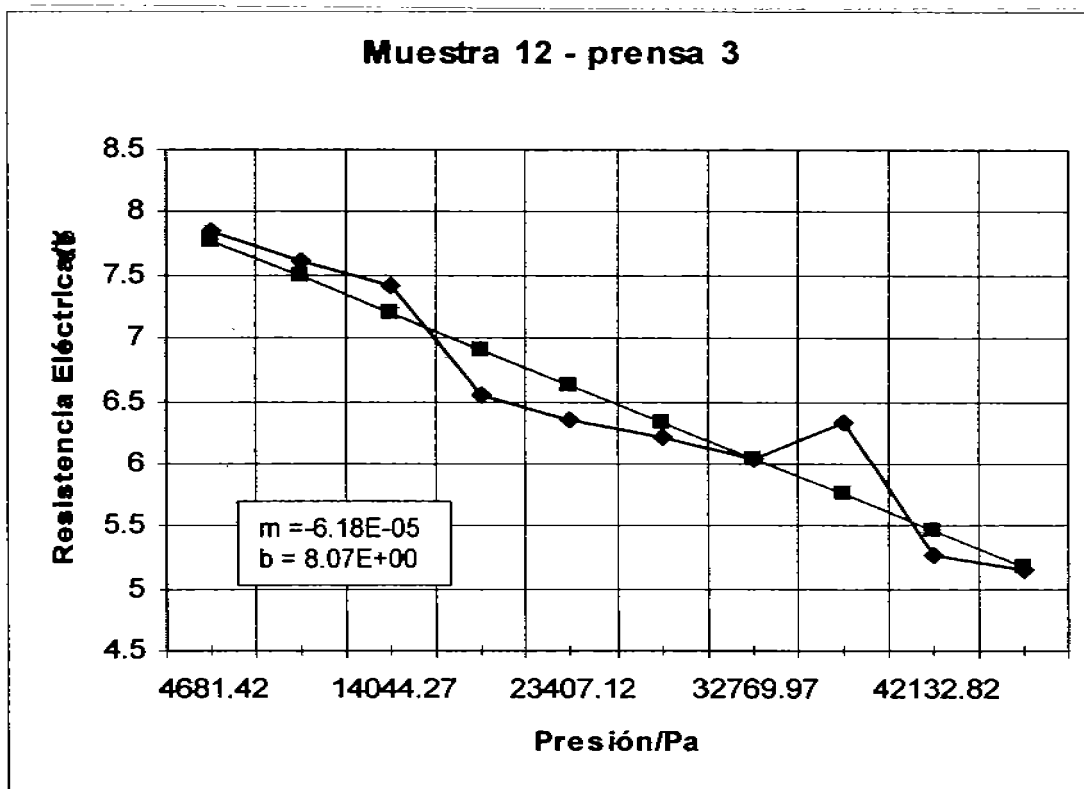
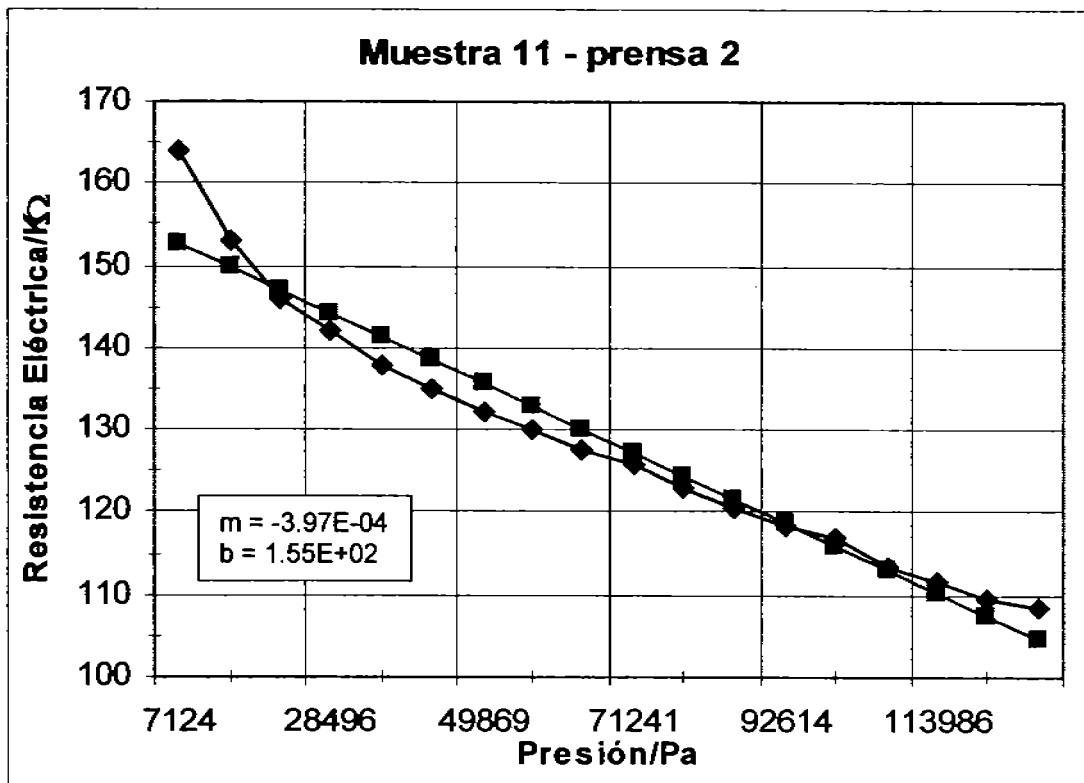
Muestra 3 - prensa 2



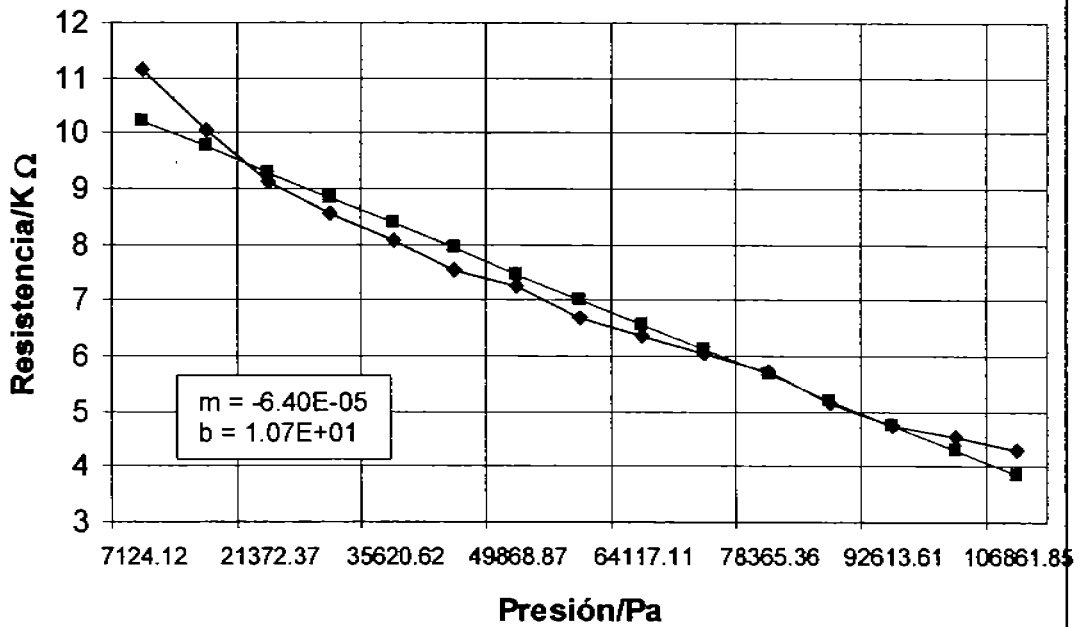




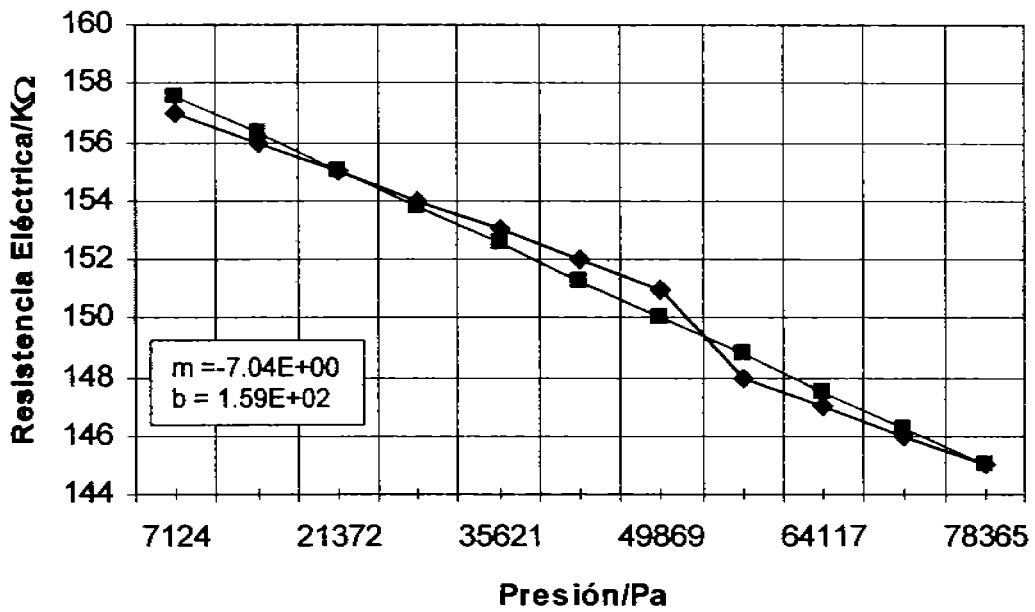




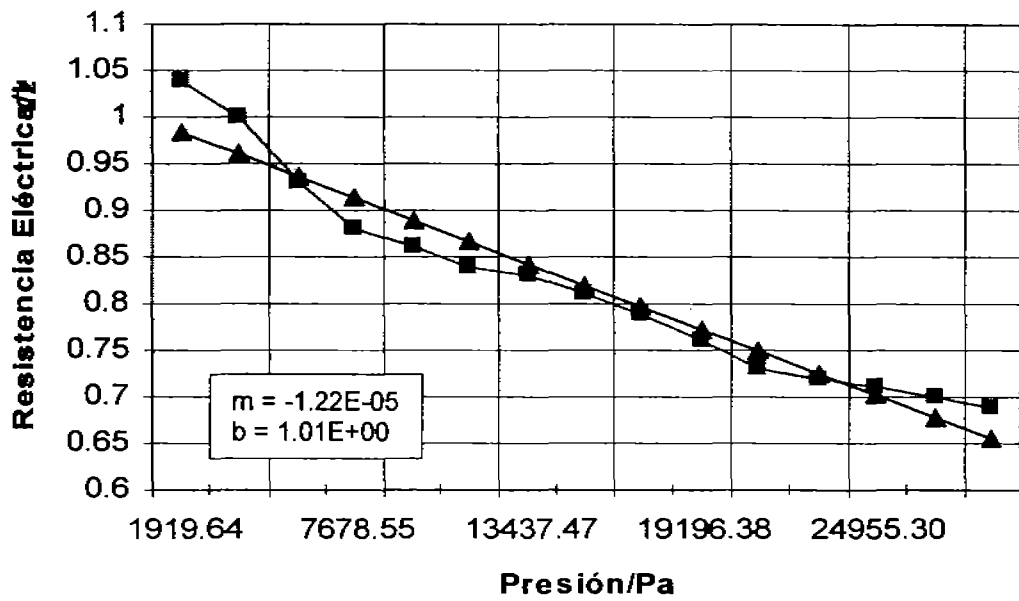
Muestra 13 - prensa 2



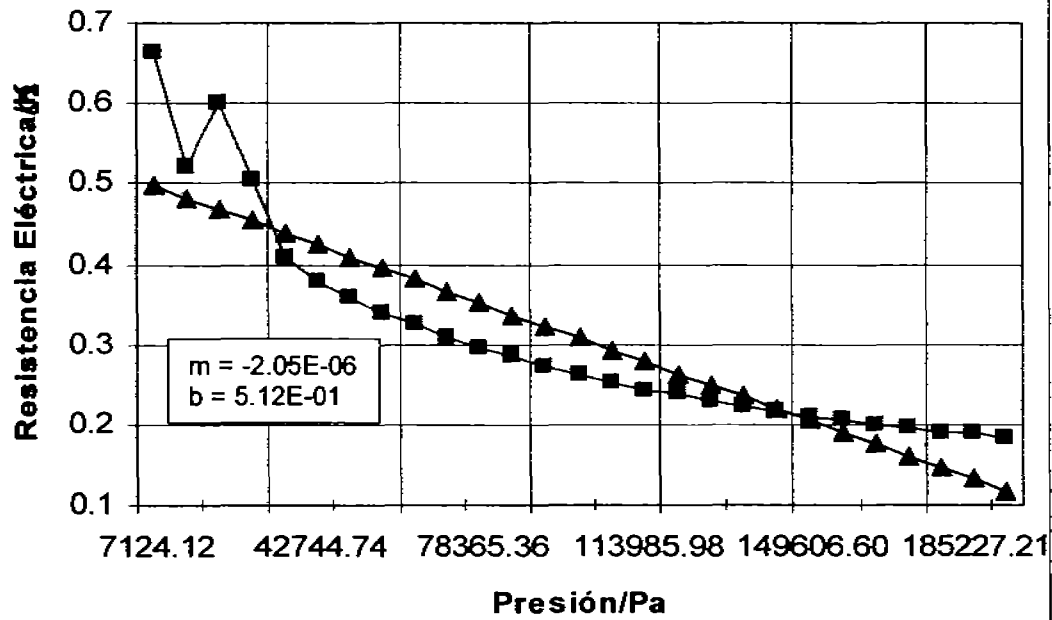
Muestra 14 - prensa 2



Muestra 15 - prensa 1

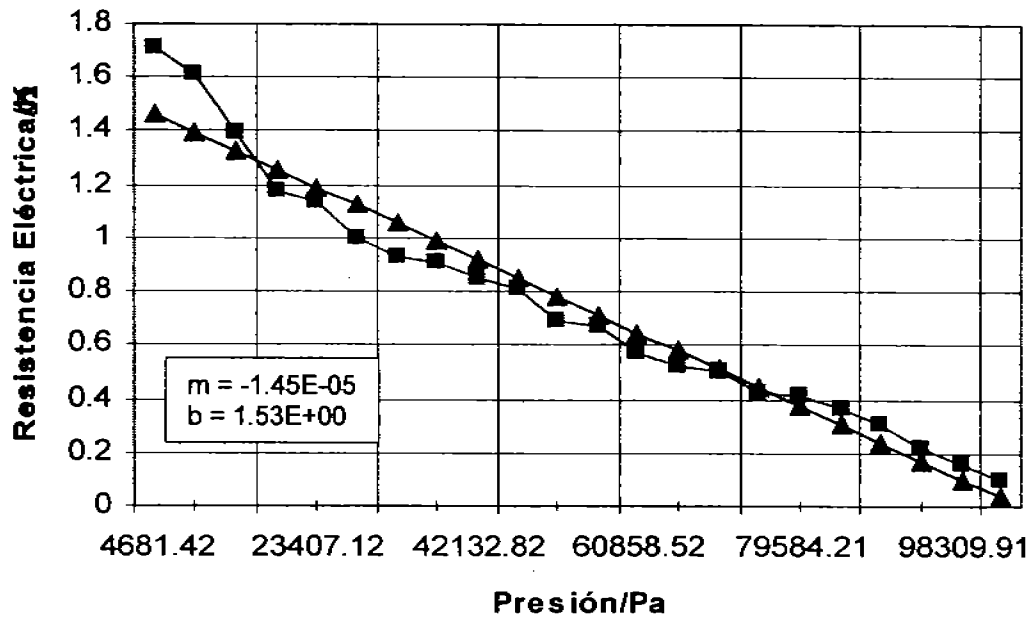


Muestra 15 - prensa 2

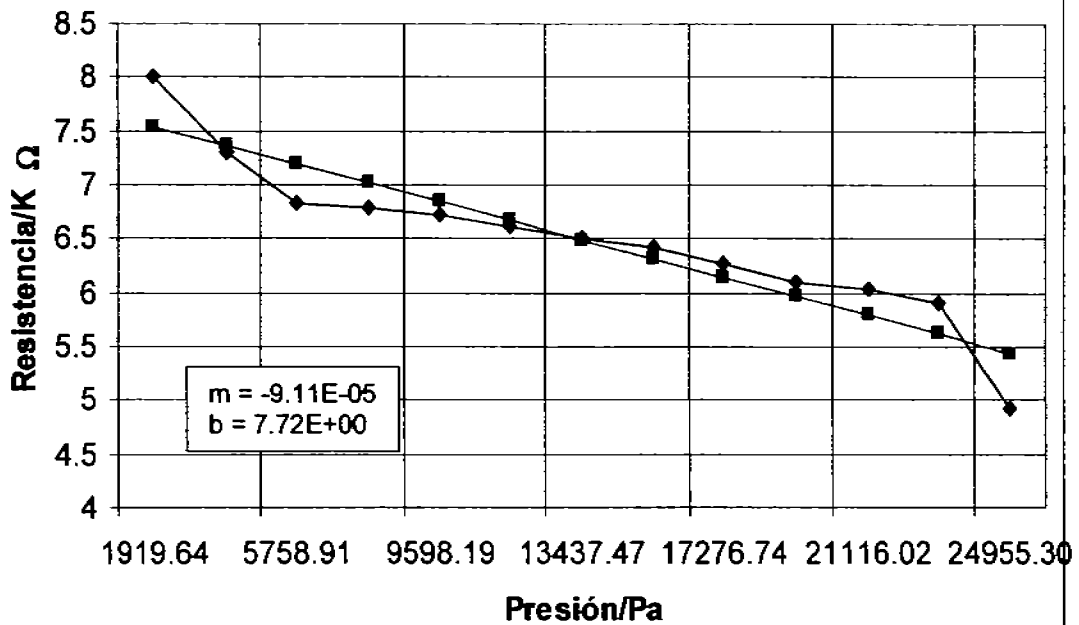




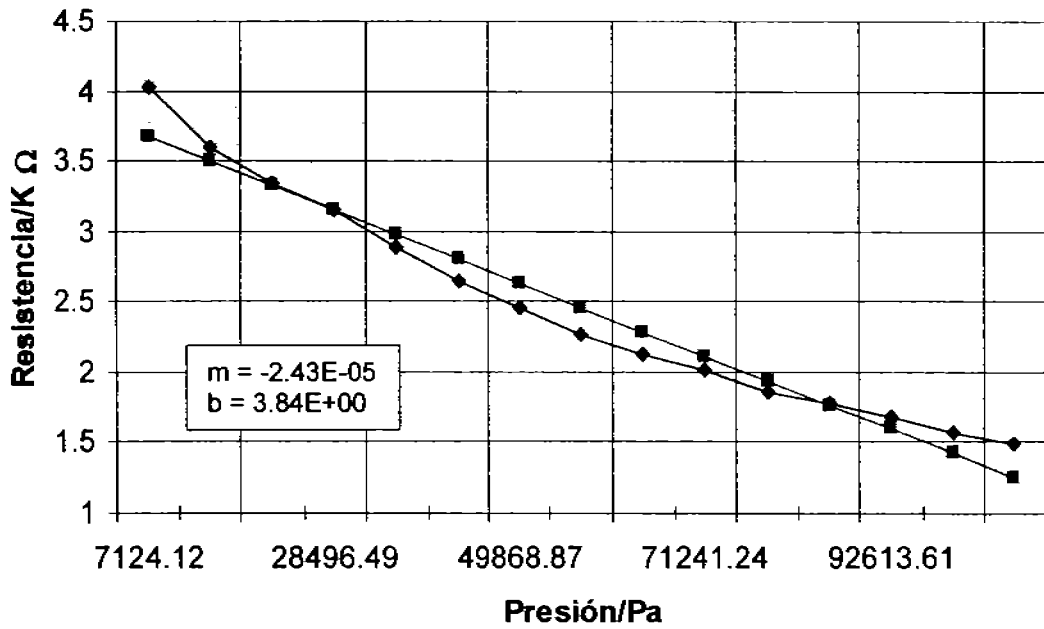
Muestra 15 - prensa 3



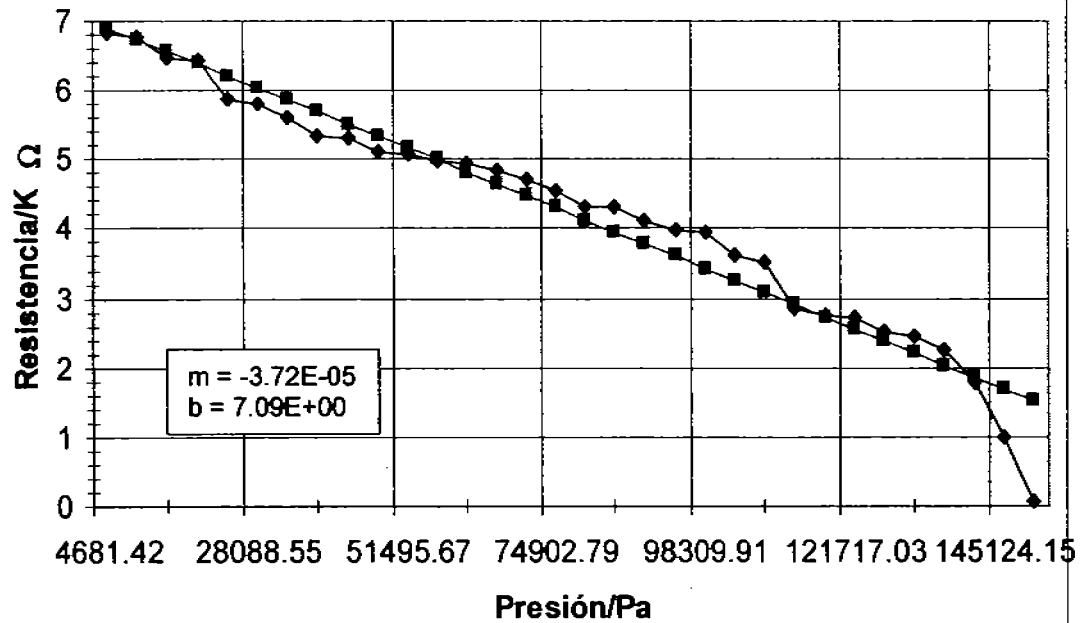
Muestra 16 - prensa 1



Muestra 16 - prensa 2



Muestra 16 - prensa 3



### **CAPITULO 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.**

#### **RESORTES.**

Los resultados obtenidos en la fabricación de las prensas, permite ver que el procedimiento es razonablemente bueno; aún cuando hay que corregir algunos detalles de diseño para evitar que el resorte se pueda atorar; o que la fricción con las paredes del cilindro donde se comprime, pueda producir lecturas falsas. Es posible que esta situación se diera En el proceso de calibración, lo cual puede ser la causa de que algunos puntos se alejen del comportamiento lineal. No obstante lo anterior, los coeficientes de correlación para las gráficas que describen el comportamiento de cada resorte son muy próximas a uno (en todos los casos fueron mayores a 0.98).

El valor más representativo de las constantes de restitución, se tomó como la pendiente de la recta ajustada por el método de mínimos cuadrados. Y en los tres casos, el valor ajustado de la ordenada al origen es muy cercano a cero (véase la Tabla 4.)

La compresión del resorte se hizo mediante un tornillo, que en las prensas uno y dos fue de dieciocho hilos por pulgada, en tanto que en la prensa tres fue de dieciséis hilos por pulgada. Como la cabeza de los tornillos es hexagonal, puede lograrse un giro de  $1/6$  de vuelta sin mucha incertidumbre; por lo que la resolución del avance fue de 0.26 de milímetro. Hay que considerar el juego del espacio entre las cuerdas que repercute en la posición del avance del tornillo; sin embargo, en tanto que el tornillo avanza en una dirección este efecto no es apreciable.

En un diseño posterior se puede emplear el tornillo de un micrómetro o de otro calibrador de precisión, con lo cual se puede mejorar la resolución. Además entre los soportes o tapas de los resortes y el tornillo de avance se pueden centrar pequeños rodamientos de acero (balines) para disminuir la fricción. Lo anterior no se consideró necesario para este prototipo.

#### **MUESTRAS.**

Como se puede observar a partir de las gráficas presentadas en capítulo anterior, los resultados obtenidos para las muestras que potencialmente pueden ser los sensores de presión de las herramientas terminales del brazo robótico; tienen un comportamiento aproximadamente lineal, en casi todo el intervalo de presiones investigado. Si los sensores se conectaran a una computadora o a un microcontrolador, existe además, la posibilidad de hacer un tratamiento de linealidad seccional, en función de en qué intervalo se esté trabajando, lo cual es usual en los sensores que no son lineales como los termistores, cuando se emplean en un intervalo amplio de temperaturas.

Como puede observarse del resultado del modelo de esferas homogéneas, la conductividad del medio resulta proporcional a la presión aplicada. Por lo que, la resistencia debe variar de forma hiperbólica respecto a la presión: La aparente contradicción respecto a la linealidad supuesta en las gráficas obtenidas, estriba en que los intervalos en los que se hizo la investigación de la variación de la resistencia resultan pequeños comparados con el intervalo donde se hace evidente comportamiento hiperbólico. Esto puede apreciarse en las gráficas 4, 7, 8, 11, 13, 15 prensas 2 y 3; 16 prensa 2, ya que, a la izquierda de la gráfica, los puntos obtenidos se alejan de la relación lineal, apareciendo por encima de la recta ajustada, lo que hace sospechar una conducta de tipo hiperbólico. Lo anterior da la pauta para hacer una investigación posterior en intervalos donde se aplique una menor presión.

El hecho de que se haya preferido hacer una gráfica lineal en la respuesta se debe a la intención de utilizar los prototipos generados como sensores para un fin específico. No obstante aún cuando se advierte la relación inversamente proporcional, para los intervalos considerados el comportamiento puede ajustarse con una buena aproximación al de una línea recta

No obstante lo anterior, todavía es necesario realizar más pruebas referentes a la estabilidad y el envejecimiento de las muestras. Los resultados preliminares indican que las más estables resultaron ser las de hule de silicón. Entre los prototipos preparados se realizaron dos con esferas de hule de silicón recubiertas con las mezcla de grafito y mármol, de dimensiones homogéneas y otra de esferas de unicel sometidas al mismo tratamiento. Sin embargo, los resultados todavía no son concluyentes.

Las mezclas de material conductor se hicieron con proporciones diversas de grafito y mármol, para optimizar los valores de resistencia en intervalos que fueran fácilmente medibles; ya que el grafito tiene una alta conductividad, en tanto que el mármol es un material de baja conductividad; la mezcla resultó muy eficiente, estable, al menos con las pruebas preliminares. En realidad es necesario modificar la técnica de medición preparando substratos a los que se les pueda aplicar la técnica de cuatro puntas para determinar su conductividad. Esta técnica es la que tiene mayor aceptación.

Las muestras que presentaron menos estabilidad, son las que usan un substrato de material sintético, con el material conductor dentro de sus poros, pues si bien resultan muy sensibles, por el coeficiente de restitución del substrato, los polvos tienden a acumularse en la parte inferior; con lo cual no se obtienen resultados reproducibles a largo plazo.

#### CONCLUSIONES.

1. El aparato construido para aplicar la presión; se puede emplear con buena confiabilidad para realizar experimentos en donde se requiere aplicar presión en intervalos semejantes.
2. Se pueden modificar los intervalos de presión cambiando los resortes por otros con constantes de restitución diferentes; con lo cual se estima que, por lo menos, se puede cubrir una región de presiones de dos o tres veces la empleada en el proceso de caracterización de las muestras.
3. Las muestras preparadas pueden usarse como sensores piezo - resistivos del tipo modular, sus dimensiones se pueden ajustar a las necesidades específicas del experimento donde se medirá esta variable
4. Las muestras hechas con hule de silicón son las que presentan mayor resistencia al envejecimiento
5. Los intervalos de detección de presión con estos dispositivos van desde 2000 Pa hasta 300000 pa, pero se estima que este intervalo puede ser mayor, aun cuando la respuesta no sea lineal.

6. Es necesario seguir experimentando con diferentes arreglos y diferentes materiales.

#### SUGERENCIAS.

1. Se sugiere optimizar el diseño de las prensas para tener un intervalo mayor de operación y una mayor precisión.
2. Para la preparación de futuras muestras, se propone utilizar mezclas de grafito en un substrato de hule de silicón con la técnica de spin - coating; para lo cual será necesario diseñar el equipo adecuado y usar un solvente para el hule de silicón.
3. Se sugiere emplear la técnica de cuatro puntas para medir la resistencia de las películas generadas con la propuesta anterior.

#### BIBLIOGRAFÍA.

1. Colman, Jack P. Métodos experimentales para ingenieros. Edit. Interamericana de México. Segunda edición. Estados Unidos. 1999.
2. Mata Hernández Gloria. Manual de prácticas de transductores y convertidores eléctricos Edit. Facultad de ingeniería, UNAM. México. 1995.
- 3 Varios autores. The robots builders bonanza. Mc Comb. Primera edición. Edit. Mc Graw Hill. Estados Unidos.1997.
4. A. Doebelin. Measurment Systems. Edit. Mc Graw Hill. 1984.
5. Varios autores. Manual de prácticas de transductores y convertidores eléctricos. Facultad de Ingeniería, UNAM. 1986.
6. Rangel Ramírez, Alejandro. Elementos para el diseño de recipientes a presión. FES Zaragoza, UNAM. 1986.

#### DIRECCIONES DE INTERNET.

[http://www.puc.cl/sw\\_educ/neurociencias/](http://www.puc.cl/sw_educ/neurociencias/) (9/ 2 / 2007)

[carrillo@henera.unt.edu.ar](mailto:carrillo@henera.unt.edu.ar) (29/3/2007)

<http://www.isa.cie.uva.es/~maria/sensores.pdf> (12 / 4 / 2007)

<http://www.elmundo.es/navegante/2007/07/21/tecnologia/1185028987.html>

<http://www.elmundo.es/salud/1998/290/01920.htm>